

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Moderní způsoby dokončování vnitřních válnových ploch

Modern Ways Finishing Machining of
Internal Cylindrical Surfaces

Student:

Petra Horáčkova

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Václav Musil

Zadání bakalářské práce

Student: **Petra Horáčková**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**
Téma: **Moderní způsoby dokončování vnitřních válcových ploch**
Modern Ways Finishing Machining of Internal Cylindrical Surfaces
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor dané problematiky.
3. Návrh řešení.
4. Technicko-ekonomické zhodnocení.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

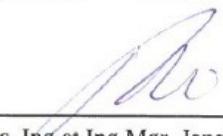
ŠTUPLA, Miloslav. *CNC obrábecí stroje a jejich programování*. Praha: BEN -technická literatura, 2006. ISBN 978-80-7300-207-7.
BRYCHTA, Josef; SADÍLEK Marek; ČEP Robert; PETRŮ Jana. *Progresivní metody v obrábění: studijní opora*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2513-7.
NESLUŠAN, Miroslav. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2007. ISBN 978-80-8070-711-8.
HAVRILA, Michal; JOZEF ZAJAC; JOSEF BRYCHTA; JOZEF JURKO. *Top trendy v obrábaní. I. časť – Obráběné materiály*. Žilina: Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. ISBN 80-968954-2-7.
PERNIKÁŘ, Jiří; JOSEF VAČKÁŘ a MIROSLAV TYKAL. *Jakost a metrologie*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1997-0.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Musil**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019


doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20. 5. 2019

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Hana Belina", written over a dotted line.

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědoma, že na tuto moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen „autorský zákon“), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo).
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dále, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. 5. 2019

Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Petra Horácková

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Potočná 135, Stará Ves u Rýmařova, 793 43

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

HORÁČKOVÁ, P. *Moderní způsoby dokončování vnitřních válcových ploch: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2019, 63 s. Vedoucí práce: Musil, V.

Tato bakalářská práce je zaměřena na téma moderní způsoby dokončování vnitřních válcových ploch. Jejím obsahem je přehled několika jednotlivých dokončovacích operací zaměřených na vnitřní plochy. Práce je strukturována na dvě části, na teoretickou a praktickou. V teoretické části jsou obecně rozebrány metody vhodné pro dokončování vnitřních válcových ploch, jsou zmíněny jejich vlastnosti, použití, stroje či nástroje. Praktická část zahrnuje podrobný popis metody dokončování/hlazení diamantem a také návrh dokončovacího diamantového nástroje, což bylo také hlavním cílem této bakalářské práce.

ANOTATION OF BACHELOR THESIS

HORÁČKOVÁ, P. *Modern Ways of Finishing Machining of Internal Cylindrical Surfaces: bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Metrology, 2019, 63 p. Thesis head: Musil, V.

This bachelor thesis is focused on modern ways of finishing of inner cylindrical surfaces. Its goal is to find out if it is a finishing operation focused on indoor surfaces. The thesis is structured in two parts, theoretical and practical. In the theoretical parts there are generally applicable methods that serve to complete the inner cylindrical surfaces, their properties, uses, machines or tools. The practical part, which contains a detailed description of the finishing / smoothing method of diamonds and proposals for solving diamond tools.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	9
0 Úvod.....	11
1 Dokončovací metody obrábění	12
1.1 Jemné soustružení	12
1.1.1 Charakteristika metody	12
1.1.2 Nástroje	13
1.1.3 Stroje.....	14
1.2 Jemné frézování	15
1.2.1 Charakteristika metody	15
1.2.2 Nástroje	15
1.2.3 Stroje	16
1.3 Honování	17
1.3.1 Charakteristika metody	17
1.3.2 Použití metody	18
1.3.3 Honovací nástroje	19
1.3.4 Honovací stroje	20
1.3.5 Chladicí a řezné kapaliny	21
1.4 Lapování.....	21
1.4.1 Charakteristika metody	21
1.4.2 Použití metody	22
1.4.3 Lapovací nástroje	22
1.4.4 Lapovací stroje.....	23
1.5 Broušení	23
1.5.1 Charakteristika metody	23
1.5.2 Brousící nástroje	25
1.5.3 Brousící stroje	25

1.6	Válečkování.....	26
1.6.1	Charakteristika metody	26
1.6.2	Použití metody	27
1.7	Válečkování/hlazení.....	28
1.7.1	Charakteristika operací	28
1.7.2	Použití operací	28
2	Hodnocení kvality obrobeného povrchu.....	29
2.1	Integrita povrchu	29
2.1.1	Makrogeometrie obrobené plochy	29
2.1.2	Mikrogeometrie obrobené plochy.....	30
2.1.3	Zpevnění povrchu při obrábění	30
2.1.4	Zbytková napětí pod obrobeným povrchem	31
2.1.5	Fyzikálně chemický stav povrchu – struktura povrchových vrstev.....	31
2.2	Porovnání drsnosti jednotlivých dokončovacích ploch.....	31
3	Tváření povrchu diamantovým nástrojem (válečkování, hlazení)	32
3.1	Kvalita obrobku.....	32
3.2	Vlastnosti materiálu	33
3.2.1	Pevnost.....	33
3.2.2	Tvrdost	33
3.3	Podstata a cíl válečkování	34
3.3.1	Hlazení materiálu válečkováním.....	34
3.3.2	Zpevňování hlubokým válečkováním.....	35
3.4	Druhy válečkovacích nástrojů.....	36
3.5	Využití válečkovacích nástrojů	36
3.5.1	Požadavky na stroje	36
3.5.2	Použití nástrojů	36
3.5.3	Nástrojové stopky a možnosti upnutí.....	36
3.5.4	Chlazení/mazání.....	37

3.6	Charakteristika operace hlazení	37
3.7	Obecné výhody hlazení diamantem	37
3.8	Chlazení diamantu.....	38
3.9	Konstrukční provedení nástrojů	38
3.9.1	Diamantový hladicí nástroj, variabilní vnitřní	39
3.9.2	Diamantový hladicí nástroj pro vnitřní obrábění	41
3.9.3	Diamantový hladicí nástroj pro vnitřní obrábění se základním tělesem	43
3.9.4	Diamantový hladicí nástroj pro vnitřní obrábění, zvýšená tuhost	45
3.10	Přítlak hrotu pomocí pružiny	47
4	Konstrukční návrh nástroje.....	48
4.1	Návrh nástroje (Program Autodesk Inventor Professional 2019).....	49
4.2	Obrobek, hlavní části nástroje.....	49
4.2.1	Obrobek.....	49
4.2.2	Tělo nástroje.....	49
4.2.3	Hlava nástroje	50
4.2.4	Spojovací čep, diamant	51
4.2.5	Pružina nástroje.....	51
4.3	Vlastnosti použitých materiálů.....	52
4.3.1	Konstrukční ocel 14 220	52
4.3.2	Konstrukční ocel 15 142	53
5	Návrh vhodných technologických podmínek	54
6	Technicko-ekonomické zhodnocení	54
6.1	Cenové porovnání dokončovacích operací	55
	Závěr	57
	Seznam použitých zdrojů.....	59
	Přílohy.....	63

Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
3D	Trojrozměrný	
A	Tažnost	[%]
Al	Chemická značka hliníku	
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý	
a _p	Hloubka řezu	[mm]
C	Chemická značka uhlíku	
Cr	Chemická značka chromu	
Cu	Chemická značka mědi	
ČSN	Česká technická norma	
D	Označení průměru	[mm]
DIN	Německá norma	
f	Posuv	[mm]
HRC	Tvrdost	
HSK	Upínání nástrojů	
IT	Tolerance přesnosti	
Kč	České koruny	
KNB	Kubický nitrid boru	
L	Označení délky	[m]
Mg	Chemická značka hořčíku	
Mil.	Milion	[kč]
Mn	Chemická značka manganu	
Mo	Chemická značka molybdenu	
Ni	Chemická značka niklu	
P	Chemická značka fosforu	
R _a	Střední aritmetická úchylka profilu	[μm]
R _m	Mez pevnosti	[MPa]
S	Průřez třísky	[mm ²]
Si	Chemická značka křemíku	
SiC	Karbid křemíku	
SK	Slinuté karbidy	
t _{as}	Strojní čas	[mm]

v	Rychlost	[m.min ⁻¹]
VDI	Upínání nástrojů	
α	Úhel alfa	[°]
%	Procento	
±	Plus, minus	
∅	Průměr	[mm]
°	Stupeň	
°C	Stupeň Celsia	

0 Úvod

Bakalářská práce se zabývá dokončovacími metodami vnitřních válcových ploch. Tyto metody mají za úkol zvýšit jakost obráběné plochy, přesnost tvarů a rozměrů součástí, zlepšit vzhled a také fyzikální a mechanické vlastnosti součástí.

Budeme-li na konečném výrobku požadovat například drsnost $R_a = 0,4 \mu\text{m}$, bohužel, takovou hodnotu nejsme schopni získat běžnými způsoby třískového obrábění. Proto po těchto konvenčních způsobech obrábění přicházejí na řadu dokončovací metody úpravy povrchu.

Nízkou drsnost povrchu, rozměry, tvar a vzájemnou polohu jednotlivých částí strojírenských výrobků je nutné dodržet především kvůli jejich správné a spolehlivé funkci.

Dokončovací obrábění vnitřních válcových ploch můžeme použít metody jako je soustružení, honování, broušení, lapování, válečkování nebo tváření diamantovým nástrojem. Honováním lze obrábět téměř všechny materiály a dokážeme docílit vysoké přesnosti geometrického tvaru. Nelze touto metodou opravit souosost. Metodu broušení lze definovat jako obrábění mnohabřitým nástrojem, díky kterému dosáhneme velmi přesných a jakostních povrchů. Úprava otvorů či vnitřních ploch broušením bývá obtížnější. Lapování je metoda, pomocí které dosáhneme nejlepší jakosti obrobene plochy ze všech způsobů obrábění. Nevýhodou je velká pracnost, vysoké náklady a malá produktivita. Válečkování obsahuje mnoho výhod, jako např. zvýšení produktivity práce nebo snížení strojních časů. Metoda je velice podobná tváření diamantovým nástrojem. Je to zcela samotná skupina nástrojů pro hlazení povrchů, která je schopna dosáhnout drsnost povrchu pod $1 \mu\text{m}$. Je vhodná pro obrábění velice tvrdých materiálů.

Po seznámení se s vlastnostmi, výhodami a nevýhodami vybraných dokončovacích metod se metoda tváření diamantovým nástrojem jeví jako ta nejvýhodnější. Nástroje této metody jsou navrženy tak, aby vyhovovaly po všech technických i praktických stránkách.

Cílem práce bylo zmínit a popsat jednotlivé dokončovací metody vnitřních válcových ploch, zaměřit se především na tváření povrchu diamantovým nástrojem a provést podrobný popis. Bylo zmíněno mnoho informací, jako např. charakteristiky metod válečkování a hlazení, vlastnosti dokončovacích materiálů nebo konstrukční provedení nástrojů. Dále byly popsány 4 varianty nástrojů pro dokončení vnitřních ploch diamantem. Jako poslední bod před samotným návrhem diamantového nástroje byl stručný popis přítlaku hrotu pomocí pružiny.

Jako hlavní cíl této bakalářské práce bylo navrhnout dokončovací nástroj pro metodu hlazení diamantovým nástrojem. Přítlak na diamantový hrot zajišťuje výše zmíněná pružina.

1 Dokončovací metody obrábění

Dokončovací metody se používají při opracovávání takových součástí, u kterých je předepsána taková drsnost povrchu, ale také rozměrová i geometrická přesnost, kterou dříve popsány způsoby obrábění není výhodné po ekonomické stránce dosáhnout. Mnohdy to ani není možné.

Při dokončovacím obrábění jsou odebrány třísky při vysokých řezných rychlostech a malých měrných tlacích. Díky těmto podmínkám se docílí vysoké kvality povrchové vrstvy. Dokončovací metody jsou charakteristické tím, že vyvolávají v povrchové vrstvě zbytková tlaková pnutí, která společně s nízkou drsností zlepšují, ale také zhoršují funkční vlastnosti součástí, hlavně jejich mez únavy, odolnost proti korozi a opotřebení.²

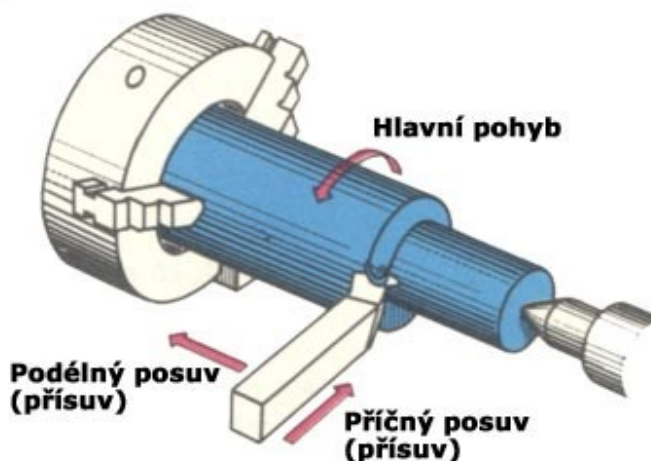
1.1 Jemné soustružení

1.1.1 Charakteristika metody

Jemné soustružení je stejné jako klasické soustružení, jen má jiné řezné podmínky, nástroje a vyžaduje velkou tuhost soustavy stroj – nástroj – obrobek.⁹

Pro jemné soustružení musí být plocha obrobena alespoň v sedmém stupni přesnosti. Přídavek na dokončení bývá 0,15 mm – 0,25 mm. Řezná rychlost soustružení je až 1000 m.min⁻¹, posuv bývá 0,2 mm.ot⁻¹.

Tato operace je zařazena mezi zvláštní druhy třískového obrábění. Většinou se provádí jednobřitým nástrojem se slinutým karbidem nebo polykrystalickým diamantem, popřípadě řeznou destičkou, jejíž břit je z kubického boru.⁸



Obr. 1.1 - Schéma soustružení¹⁰

Hlavní znaky jemného soustružení:

- vysoká řezná rychlost v ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$),
- malý posuv nástroje f ($\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$), odebírá se velmi malý průřez třísky S (mm^2),
- malá hloubka řezu a_p (mm).

Výhody jemného soustružení:

- obrobený povrch je kovově čistý bez vtlačených brusných zrn,
- minimální deformace v povrchové vrstvě (vysoká řezná rychlost a malý průřez třísky),
- malý vývin tepla zaručuje stálost tvaru obrobené plochy.⁸

1.1.2 Nástroje

Nástroje, které se k jemnému obrábění používají, musí být dostatečně tuhé. Mohlo by při obrábění vznikat chvění, což je nevyhovující pro obráběcí proces.⁸

Obráběcí nástroj musí prokazovat vlastnosti, jakož jsou mimo jiné vysoká tvrdost i za zvýšené teploty, stálost tvarů a rozměrů při tepelném zpracování a odolnost proti otěru i za větších řezných rychlostí.¹¹

a) Řezný materiál – slinutý karbid

Typické vlastnosti slinutých karbidů jsou vysoká tvrdost, vysoká trvanlivost, tlaková pevnost a odolnost proti otupení za vysokých teplot a vysokých řezných rychlostí. Pro svou křehkost jsou slinuté karbidy citlivé na rázové namáhání.¹³

Jedny ze třech základních skupin karbidů jsou karbidy wolframtitanové. Jsou určeny pro materiály s dlouhou plynulou třískou, která vzniká právě při jemném obrábění.¹¹

b) Řezný materiál – kubický nitrid boru (KNB)

Kubický nitrid boru má velmi vysokou tvrdost, houževnatost a ořezuvzdornost. Je schopený odolávat teplotám při obrábění až do $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dále má stabilní tvrdost při vyšších teplotách, možnost obrábět materiály nad 48 HRC a také má vysokou kvalitu povrchu.¹¹

c) Nástroje z řezné keramiky

Řezná keramika má vysokou tvrdost i za vysokých teplot. Je odolná proti otěru, je chemicky stálá, snáší teplotu 1200 °C a můžeme ji používat při vysokých řezných rychlostech 1000 m.min⁻¹, mnohdy i vyšších. Naopak nevýhodou je její křehkost.¹¹

d) Nástroje z diamantu

Je to nejtvrdší přírodní krystal, proto je také vhodný pro obrábění materiálů s tvrdostí až 60 HRC. S diamantem lze při obrábění dosáhnout drsnosti povrchu pod 1 μm. Díky němu lze zvýšit povrchové vrstvy materiálu, meze únavy a únosnosti. Při dokončovacích operacích diamantem nevzniká žádný prach, čímž se více šetří životní prostředí.¹

1.1.3 Stroje

Jelikož se u obrobených dílů vyžaduje stále vyšší rozměrová a tvarová přesnost, zvyšují se také nároky na stroje. Aby stroj plnil správnou funkci během obrábění při vysokých rychlostech, musí splňovat několik požadavků, těmi nejdůležitějšími jsou:

- vysoká tuhost celého systému stroj – nástroj – obrobek,
- rámy lehké a tuhé, s vysokými vlastními frekvencemi a dobrým útlumem mechanických šoků a vibrací,
- vysoké technické parametry stroje – rychloposuvy, pracovní posuvy, pracovní přesnost, řezná rychlost.¹³

Tvarová a pracovní přesnost obráběcích strojů se hodnotí podle hospodárnosti, která je dosahovaná tvarovou a rozměrovou přesností obrobených ploch.

Tato přesnost závisí na konstrukčním pojetí a tuhosti stroje. Pracovní přesnost obráběcího stroje je ovlivňována několika faktory:

- tuhostí celku i rozhodujících prvků jakými jsou ložiska, pracovní vřeteno a vodící dráhy,
- kvalitou zpracování jeho funkčních částí a pečlivostí provedené dílčí i celkové montáže,
- přesností nastavení nástroje vzhledem k obrobku,
- tepelnými deformacemi.²⁹

1.2 Jemné frézování

1.2.1 Charakteristika metody

Mezi zvláštní druhy třískového obrábění patří i jemné frézování. Podstata je vlastně stejná jako u klasického frézování a soustružení, jen se liší řeznými podmínkami a nástroji. Tato metoda vyžaduje i velkou tuhost soustavy stroj – nástroj – obrobek.⁹ Obrábění probíhá zejména na numerických strojích, které mají vysokou tuhost a vysoké otáčky pracovního vřetene.¹⁴

Tříska je při tomto frézování odebrána břitý rotujícího nástroje. Tento nástroj se nazývá fréza. Jako hlavní pohyb je považován pohyb rotační, je vykonáván nástrojem. Vedlejší pohyb se nazývá posuv, bývá většinou přímočarý a je vykonáván obrobkem.⁴

Řezný proces frézování je přerušovaný. Jednotlivé zuby nástroje postupně vnikají a vynikají z materiálu a odebírají třísku proměnného průřezu. Co se týče chvění, je výhodou, že je v záběru více břitů současně.¹⁵

Hlavní znaky jemného frézování (shodné jako u jemného soustružení):

- vysoká řezná rychlost v ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$),
- malý posuv nástroje f ($\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$), odebírá se velmi malý průřez třísky S (mm^2),
- malá hloubka řezu a_p (mm).

Výhody jemného frézování (opět shodné s jemným soustružením):

- obrobený povrch je kovově čistý bez vtlačených brusných zrn,
- minimální deformace v povrchové vrstvě (vysoká řezná rychlost a malý průřez třísky),
- malý vývin tepla zaručuje stálost tvaru obrobené plochy.¹⁴

1.2.2 Nástroje

Jemné frézování je metoda, při které se frézuje velmi přesně ostřenými nástroji vykazujícími velmi malou axiální házivost zubů (ne větší než $5 \mu\text{m}$), pracujícími se setinovými posuvy na zub a hloubku řezu menší než $0,3 \text{ mm}$. Všechny břity nástroje zde ovlivňují drsnost obrobené plochy.

Jiný způsob se používá u nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami. Využívá se zde tzv. hladících destiček, majících delší rovný nebo mírně zaoblený břit, seřízený asi 0,1 mm pod úroveň frézovacích destiček. Zde tedy nemá hlavní vliv na drsnost obrobené plochy axiální házivost břitů, nýbrž drsnost obrobené plochy je vytvářena hladícím ostřím.²

a) Řezný materiál – slinutý karbid

Jak už bylo zmíněno u metody jemného soustružení, typické vlastnosti slinutých karbidů jsou vysoká tvrdost, vysoká trvanlivost, tlaková pevnost a odolnost proti otupení za vysokých teplot a vysokých řezných rychlostí. Pro svou křehkost jsou slinuté karbidy citlivé na rázové namáhání.¹³

Jedny ze třech základních skupin karbidů jsou karbidy wolframtitanové. Jsou určeny pro materiály s dlouhou plynulou třískou, která vzniká právě při jemném obrábění.¹¹

b) Řezný materiál – kubický nitrid boru (KNB)

Kubický nitrid boru má velmi vysokou tvrdost, houževnatost a otěruvzdornost. Je schopný odolávat teplotám při obrábění až do 1500 °C. Dále má stabilní tvrdost při vyšších teplotách, možnost obrábět materiály nad 48 HRC a také má vysokou kvalitu povrchu.¹¹

c) Nástroje z řezné keramiky

Řezná keramika má vysokou tvrdost i za vysokých teplot. Je odolná proti otěru, jsou chemicky stálé, snáší teplotu 1200 °C a můžeme je používat při vysokých řezných rychlostech 1000 m.min⁻¹, mnohdy i vyšších. Naopak nevýhodou je její křehkost.¹¹

d) Nástroje z diamantu

Je to nejtvrdší přírodní krystal, proto je také vhodný pro obrábění materiálů s tvrdostí až 60 HRC. S diamantem lze při obrábění dosáhnout drsnosti povrchu pod 1 μm. Díky němu lze zvýšit povrchové vrstvy materiálu, meze únavy a únosnosti. Při dokončovacích operacích diamantem nevzniká žádný prach, čímž se více šetří životní prostředí.¹

1.2.3 Stroje

Jelikož se u obrobených dílů vyžaduje stále vyšší rozměrová a tvarová přesnost, zvyšují se také nároky na stroje.

Aby stroj plnil správnou funkci během obrábění při vysokých rychlostech, musí splňovat několik požadavků, těmi nejdůležitějšími jsou:

- vysoká tuhost celého systému stroj – nástroj – obrobek,
- rámy lehké a tuhé, s vysokými vlastními frekvencemi a dobrým útlumem mechanických šoků a vibrací,
- vysoké technické parametry stroje – rychloposuvy, pracovní posuvy, pracovní přesnost, řezná rychlost.¹³

Tvarová a pracovní přesnost obráběcích strojů se hodnotí podle hospodárnosti, která je dosahovaná tvarovou a rozměrovou přesností obrobených ploch. Tato přesnost závisí na konstrukčním pojetí a tuhosti stroje. Pracovní přesnost obráběcího stroje je ovlivňována několika faktory:

- tuhostí celku i rozhodujících prvků jakými jsou ložiska, pracovní vřeteno a vodící dráhy,
- kvalitou zpracování jeho funkčních částí a pečlivostí provedené dílčí i celkové montáže,
- přesností nastavení nástroje vzhledem k obrobku,
- tepelnými deformacemi.²⁹

1.3 Honování

1.3.1 Charakteristika metody

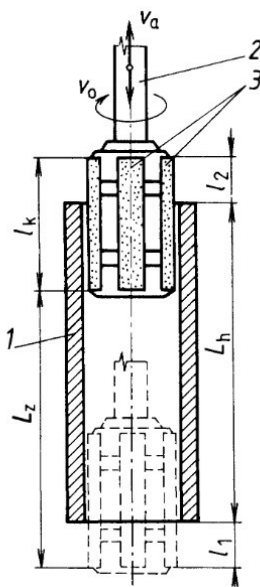
Honování je jedna z dokončovacích technologií obrábění, při které se obráběné povrchy zkvalitňují jemným přebroušováním honovacími kameny (brousícími lištami), které jsou upevněné v honovací hlavě. Ta se otáčí a v osovému směru se posouvá. Honovací kameny jsou k povrchu přitlačovány pomocí mechanismu, který umožňuje jejich radiální posuv. Současným posuvným a rotačním pohybem se dráhy zrn překrývají a na honovaném povrchu se objevují křížové stopy (rysky) svírající úhel 2α .²

Honování se nejčastěji využívá pro dokončování vnitřních válcových ploch, u vnějších válcových ploch se však používá méně. Honovat lze díry jak průchozí, tak i neprůchozí, s drážkami různých tvarů a velikostí v poměrně velkém rozsahu délek i průměrů.⁴ S přídatným zařízením lze honovat i díry kuželové.²

Tuto metodu můžeme provádět v jedné nebo více fázích:

- **jednostupňové honování** – pracuje se pouze jedním nástrojem při hrubovací i dokončovací fázi procesu,
- **dvoustupňové a vícestupňové honování** – používá se při nejvyšších nárocích pomocí hrubozrnnějšího nástroje pro rychlé odstranění přídavku a pomocí jemnozrnného pro zlepšení geometrického tvaru a drsnosti povrchu.²

Řezné podmínky honování jsou ovlivňovány především obráběným materiálem, výchozími a požadovanými parametry přesnosti tvaru a drsnosti povrchu, použitým brusivem, průměrem díry a přídavkem na honování.³



Obr. 1.2 - Princip metody honování ⁵

1 – obrobek, 2 – honovací hlava, 3 – honovací kameny

1.3.2 Použití metody

Honováním se dokončují např. pneumatické, hydraulické, brzdové válce, válce spalovacích motorů, kliková ložiska motorových bloků a ojnic, bubny, pouzdra, ložiska vřeten, ozubená kola, a tak dále.

Honováním lze dokončovat kalené i nekalené oceli, litiny, hliníkové slitiny, neželezné kovy, slinuté karbidy, tvrdé povlaky a další materiály.³

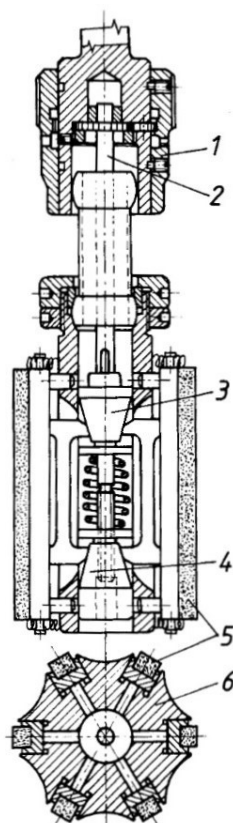
1.3.3 Honovací nástroje

Jako nástroj je sada honovacích kamenů či lišt, které jsou v rovnoměrných roztečích ustaveny po jejím obvodě.

Mechanismus hlavice je hydraulický, pneumatický nebo mechanický. Umožňuje malý radiální posuv kamenů v rozsahu několika mm, regulaci přítlačku a konečný rozměr díry.²

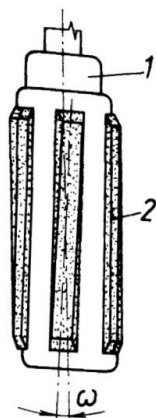
Zdali je potřeba honovat díry s drážkami, je nutné, aby šířka honovacích kamenů byla větší než šířka dvou drážek.⁴

Pro výrobu honovacích kamenů se nejčastěji používá materiál syntetický korund (Al_2O_3) nebo karbid křemíku (SiC).²



Obr. 1.3 - Honovací hlava ⁵

- 1 – otáčející se objímka, 2 – tyč na ovládání, 3 – horní kužel,
4 – dolní kužel, 5 – honovací kameny, 6 – těleso hlavy



Obr. 1.4 - Honovací hlava se šikmo uloženými honovacími kameny ⁵

1 – těleso hlavy, 2 – honovací kameny

1.3.4 Honovací stroje

Honovat lze jak strojně, tak ručně. Ručně se honuje zpravidla na vrtačkách, kde se vřeteno otáčí pomocí honovací hlavy, ručně se posouvá součást nebo vřeteno ve směru osy díry. Strojně se honuje na strojích, které mají svislý vřeteník.

Honovací stroje mohou být jednovřetenové a vícevřetenové. Pracovní cyklus se řídí ručně, ale i automaticky. Stroj je vybaven aktivní kontrolou rozměrů – např. průměru díry, a také na automatickou manipulaci s obrobkem. Regulace honovacího procesu je u nových moderních strojů zajištěna programovatelnou regulací.²



Obr. 1.5 - Honovací stroj ⁶

1.3.5 Chladicí a řezné kapaliny

Při procesu honování je velmi důležité použít řezných kapalin (medií). Mají zásadní vliv nejen na produktivitu procesu, ale i na konečnou kvalitu obrobených ploch. Vstřebávají vzniklé teplo, čímž se obrobek zbytečně nepřehřívá. Dále snižují složky řezání a odpory. Nejdůležitějším úkolem těchto medií je vyplachovat a odvádět z pórů honovacích kamenů odebírané třísky a uvolňovat částice pojiva a brusiva. Tím se udržuje jejich řezivost.⁴

Pro tyto účely se používá petrolej nebo jeho směs s olejem. Vyšší viskozita řezné kapaliny dosáhne vyššího úběru. Nižší viskozita zase dosáhne lepší drsnosti obrobené plochy.²

1.4 Lapování

1.4.1 Charakteristika metody

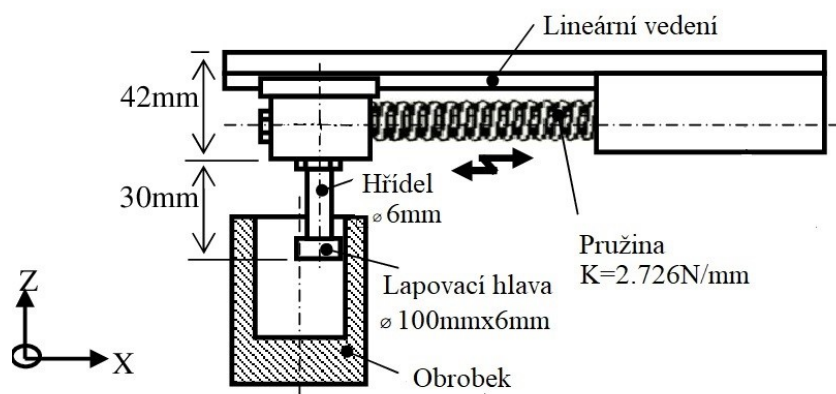
Lapování je jedna z dokončovacích metod obrábění, díky které dosahujeme nejvyšší rozměrové přesnosti a nejmenší drsnosti povrchu obráběných ploch.

Při lapování se materiál ubírá pomocí zrn brusiva, která jsou přiváděna mezi pohybující se lapovací nástroj a obrobek (lapování volným brusivem). U měkkých nástrojů mohou být zrna brusiva zamačkána nebo jinak upevněna v lapovacím nástroji.⁴

Tento dokončovací proces má dvě fáze:

- **hrubovací lapování** – dochází k mikroodírání výstupků a nerovností obráběných ploch pomocí velkého množství zrn brusiva,
- **jemné a velmi jemné lapování** – povrch se dokončuje plastickou deformací vrstvy na povrchu.²

Velkou nevýhodou je u této metody malá produktivita práce a velká pracnost. V porovnání s ostatními metodami dokončování je lapování vysoce nákladné.⁴



Obr. 1.6 – Schematický pohled na lapovací nástroj – válcový vnitřní povrch ³⁰

1.4.2 Použití metody

Tato dokončovací metoda je vhodná pro vnější i vnitřní rovinné, tvarové a válcové plochy. Lze také dokončovat měkké i tvrdé materiály, ruční lapování je nejčastěji používáno v kusové výrobě, strojní lapování je používáno především v hromadné a sériové výrobě.⁴

Lapování se používá pro úpravu kluzných uložení, při výrobě valivých ložisek, ložiskových míst hřídelů, u ventilů spalovacích motorů, mechanických ucpávek, měřidel, závitů. Jednoduše všude tam, kde je potřeba dosáhnout těsnosti ploch dvou součástí, aby se zabránilo úniku tekutin a plynů.⁷

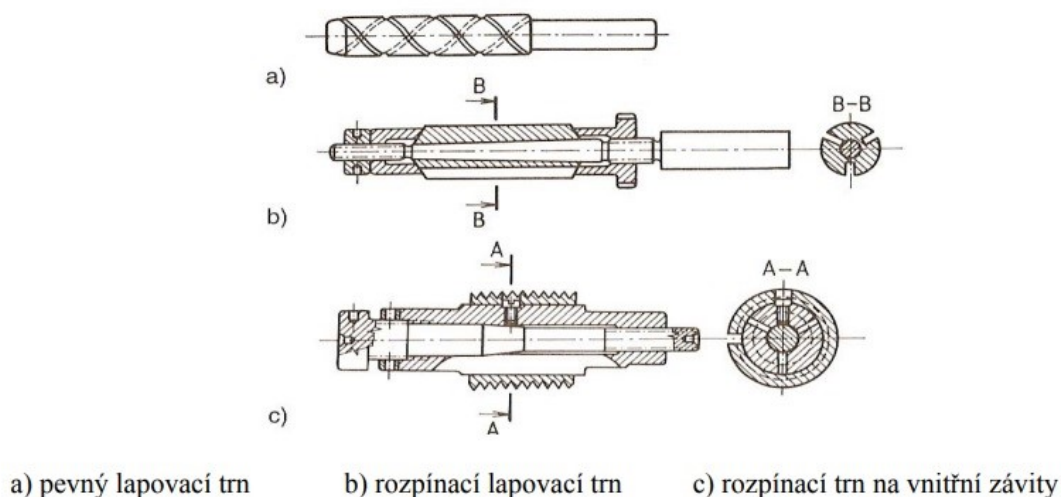
1.4.3 Lapovací nástroje

Jemné a volné brusivo, které je rozšířeno v petroleji, oleji nebo v dalších různých pastách, je dáváno do volného prostoru mezi nástroj a obrobek. Nástroj vykonává při obráběcím procesu nepravidelný pohyb vůči obráběné ploše. Díky tomuto mají zrna brusiva nepravidelný pohyb a stále mění svou dráhu.⁷

Nástroje jsou vyráběny z jemnozrnné perlitické nebo feritické litiny, měkké oceli, olova, mědi, plastických hmot, a podobně. U velmi jemného lapování se také používají nástroje z kalené oceli nebo tvrdě chromované nástroje.

Lapovací desky se užívají pro lapování rovinných ploch, lapovací prstence pro lapování vnějších válcových ploch a lapovací trny pro lapování při ručním lapování.

Litinové lapovací kotouče pro rovinné plochy nebo brousící kotouče s brusivem, které je vázáné keramickým pojivem, se užívají při lapování strojním.⁴



Obr. 1.7 – Lapovací trny pro lapování děr¹²

1.4.4 Lapovací stroje

- **univerzální stroje** – používají se pro lapování válcových i rovinných ploch,
- **speciální stroje** – používají se pro lapování určitého druhu ploch (boky zubů kol, valivá ložiska, tělíska valivých ložisek a podobně).⁴

Pro obrábění vnějších válcových a rovinných ploch se užívají dvoukotoučové lapovací stroje se svislými osami lapovacích kotoučů.³

1.5 Broušení

1.5.1 Charakteristika metody

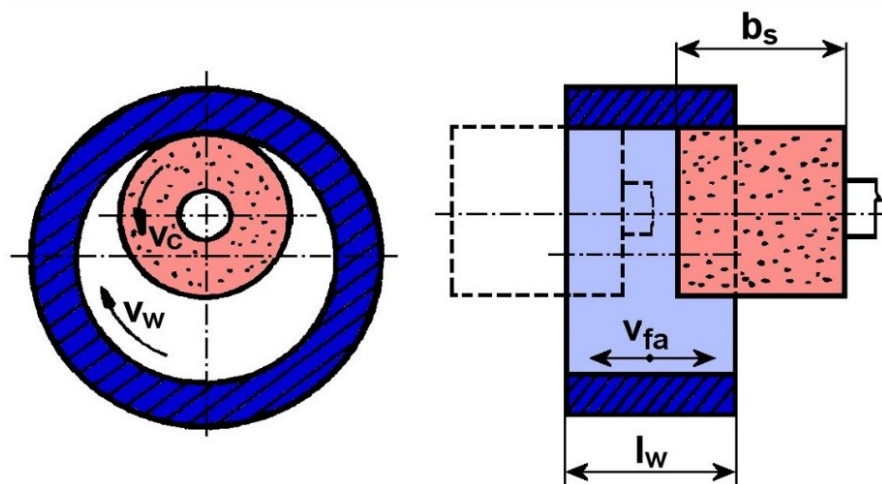
Broušení je hlavní dokončovací operace, při které jsou odebrány drobné části třísky pomocí mnohabřitých nástrojů. Nástroj – brusný kotouč, se otáčí vysokou obvodovou rychlostí. Pomocí této metody dosahujeme přesných rozměrů, požadovaných tvarů, a také drsnosti povrchu R_a 1,6 až 0,2 μm .¹⁸

Pomocí broušení můžeme upravovat různé povrchy v různých polohách, proto je spousta druhů broušení.⁴

Broušení vnitřních ploch můžeme dělit na několik základních metod:

a) axiální broušení

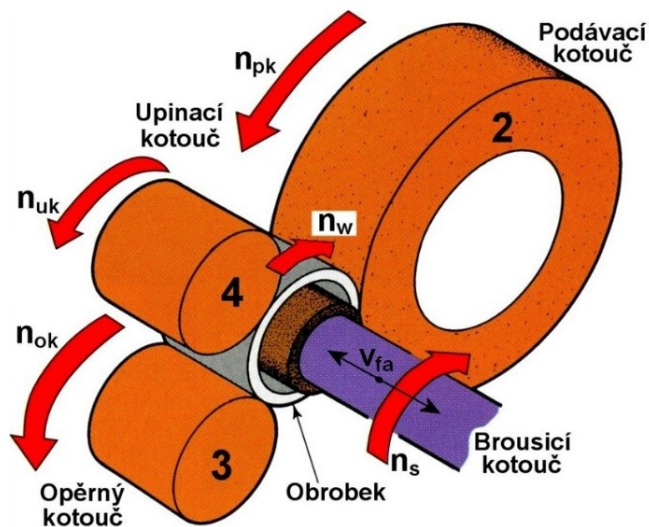
- používá se v případech, kdy délka obrobku bývá větší než šířka brousícího nástroje,
- kotouč se otáčí uvnitř díry rychlostí v_c a posouvá se ve směru osy rychlostí v_{fa} ,
- obrobek se otáčí rychlostí v_w ,
- odbroušení je zajištěno posuvem kolmým na obráběnou součást.¹⁶



Obr. 1.8 – Axiální broušení¹⁶

b) bezhroté broušení

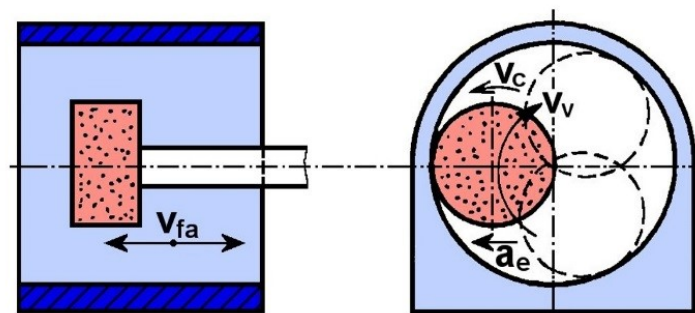
- velmi podobný způsob axiálnímu broušení – rozdíl je v upínání součásti, která je vkládána mezi tři kotouče (podávací, upínací a opěrný), podávací kotouč zabezpečuje otáčení součásti, opěrný kotouč udává polohu a upínací kotouč přitlačuje součást k oběma předchozím kotoučům,
- tento způsob lze použít pouze u součástí, které mají vnější povrch souosý s tím vnitřním.¹⁶



Obr. 1.9 - Bezhroté broušení¹⁶

c) planetové broušení

- tento způsob se používá při broušení děr ve větších součástech, které se těžce upínají do sklíčidla na brusce, obrobek se upne pevně na stůl,
- vřeteno s brousícím kotoučem se otáčí kolem vlastní osy rychlostí v_c , obíhá kolem osy broušení díry rychlostí v_v a současně se pohybuje ve směru osy díry v_{fa} .¹⁶



Obr. 1.10 – Planetové broušení¹⁶

1.5.2 Brousící nástroje

Brousící nástroje jsou tvořeny zrnny tvrdých materiálů – brusiva (oxid hlinitý, diamant, kubický nitrid boru, karbid křemíku), které jsou vázány v pevných nebo tuhých tělesech různých tvarů a velikostí.¹⁶

1.5.3 Brousící stroje

Brusky jsou stroje pro obrábění součástí, které mají mít přesné rozměry, požadovaný tvar a co nejmenší drsnost povrchu. K dosažení těchto požadavků je nutné, aby bruska měla klidný chod, pracovala bez otřesů a chvění (požadavek na tuhost stroje, přesné vyvážení rotujících hmot).¹⁷

Brusky vhodné pro obrábění vnitřních ploch jsou:

- hrotové brusky (válcové rotační plochy, případně díry),
- brusky na díry.¹⁶



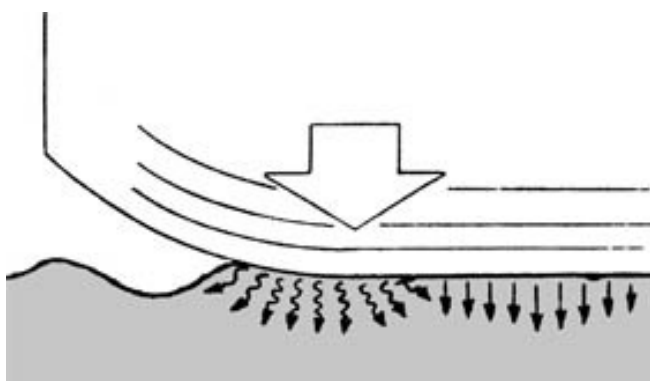
Obr. 1.11 – Bruska na díry¹⁹

1.6 Válečkování

1.6.1 Charakteristika metody

Válečkování je jedna z beztržkových metod obrábění, pomocí které můžeme zlepšovat kvalitu obráběného povrchu bez jakéhokoliv úběru materiálu. Součásti, které touto metodou projdou, nesou vysokou přesnost a kvalitní povrch. Po válečkování již není třeba součást dále obrábět či upravovat.²¹

Válečky na nástroji jsou přitlačovány proti povrchu součásti téměř kolmou silou. Díky této síle vzniká na vystouplých nerovnostech tlakové napětí, díky kterému dochází k plastické deformaci povrchové vrstvy. Materiál, který je ve výstupcích, přechází („přeteče“) do míst, kde je nižší napětí a vyplňuje je zezdola. Válečkové povrchy jsou vhodné zejména jako těsnící, kluzné či vodící plochy.²²



Obr. 1.12 – Proces válečkování²³

Povrch se po válečkování vyznačuje těmito vlastnostmi:

- nízká drsnost,
- zaoblené přechody mezi prohlubněmi a rovnými plochami,
- velký podíl materiálu na povrchu,

- rovné plochy s mělkými prohlubněmi, které dobře slouží pro zadržení maziva,²²
- válečkování sice vytvoří vysoce hladký povrch, nezlepšuje však přesnost,
- stroje, do kterých upínáme nástroje, musí mít správnou tuhost, přesnost, výkon apod.,
- musí být správně zvoleny pracovní podmínky (síla, rychlost, posuv atd.).³³

1.6.2 Použití metody

Pomocí válečkování lze dokončovat vnitřní i vnější plochy – rotační, někdy i rovinné.³ Co se týče materiálu obrobků, je možné metodu použít na všechny druhy materiálu, které jsou schopny plastického přetváření. Válečkovat lze například šedou litinu, na druhou stranu u ní nelze dosáhnout tak vysoké kvality povrchu jako například u ocelí. Aby se dosáhlo optimálních konečných výsledků válečkování, je nutno dodržet kvalitu povrchu po předchozím obrábění.²⁴

Válečkováná součást		Vnitřní povrchy			Vnější povrchy		
Materiál	Průměr D [mm]	Přídavek [mm]	R _a [μm]		Přídavek [mm]	R _a [μm]	
			Obrobený	Válečkovaný		Obrobený	Válečkovaný
Materiály s vysokou houževnatostí, A>18 %, tvrdost <25 HRC, žíhané oceli, tvárné litiny, slitiny Al, bronzy, mosazi	3 až 12	0,010	2,0	0,2	0,010	2,0	0,2
		0,017	3,1		0,015	2,5	
	12 až 25	0,017	1,5		0,012	2,0	
		0,040	3,1		0,025	4,5	
	25 až 50	0,025	1,5		0,017	2,5	
		0,050	3,1		0,025	4,5	
	50 až 165	0,040	1,5		0,025	3,1	
		0,075	5,0		0,050	10,1	
Materiály s nízkou houževnatostí, A <18 %, tvrdost <40 HRC, zušlechtěné oceli, šedé litiny, slitiny Mg, tvrdé slitiny Cu	3 až 12	0,010	2,0	0,4	0,008	1,5	0,4
		0,017	2,5		0,012	2,3	
	12 až 25	0,017	2,2		0,012	2,5	
		0,025	3,1		0,018	3,5	
	25 až 50	0,025	3,1		0,012	2,5	
		0,040	4,5		0,025	4,5	
	50 až 165	0,040	3,0		0,020	3,1	
		0,050	5,0		0,035	5,0	

Tabulka č. 1 – Přídavky materiálu pro válečkování a drsnost povrchu ploch ³

Válečkový průměr [mm]	Vnější válečkování		Vnitřní válečkování	
	Otáčky [min ⁻¹]	Posuv na otáčku [mm]	Otáčky [min ⁻¹]	Posuv na otáčku [mm]
5	1500	0,12	1000	0,15
12	1000	0,32	700	0,3
40	600	1,3	400	0,1
65	300	1,5	250	1,8
95	250	1,8	200	2,7
165	200	3,4		

Doporučené otáčky lze v případě speciálních požadavků snížit nebo zvýšit o 50 %, posuv na otáčku zvýšit o 30 %.

Tabulka č. 2 – Procesní podmínky metody válečkování ³

1.7 Válečkování/hlazení

1.7.1 Charakteristika operací

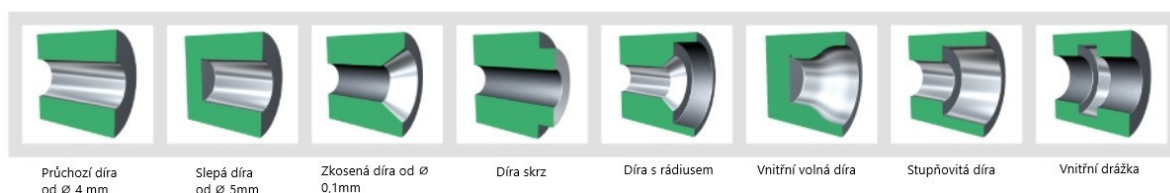
Povrch můžeme dokončovat buď nástroji přizpůsobené na válečkování nebo na hlazení. Tyto dva druhy operací jsou velmi podobné, rozdíl je jen v použitém tvářecím prvku a v pohybu, který je tvářecím prvkem konán.²⁰

Charakteristika válečkování i hlazení je podrobně rozepsána v níže uvedené kapitole č. 3.

1.7.2 Použití operací

Dokončovat lze jak vnější, tak vnitřní povrchy téměř všech rotačně symetrických obrobků.

Firma zabývající se výrobou nástrojů pro tyto operace je ale schopna nabídnout řešení na míru dle potřeb zákazníka pro téměř všechny ostatní geometrie.²⁰



Obr. 1.15 – Příklady povrchů, které lze obrábět ²⁰

2 Hodnocení kvality obrobeného povrchu

2.1 Integrita povrchu

Ovlivňování funkčnosti povrchu výrobními metodami je možno vyjádřit pojmem integrita povrchu. Tento pojem zahrnuje jednak podmínky, za jakých byla funkční plocha vytvořena, bere v úvahu technologické metody a jejich vliv na vlastnosti plochy po obrobení do vztahu k funkčním požadavkům na součást.³¹

Nejvýznamnější a nejčastější jakostní ukazatele, které můžeme zařadit do oblasti integrity povrchu jsou:

- makrogeometrie obrobené plochy (odchylky tvaru),
- mikrogeometrie obrobené plochy (drsnost),
- změny fyzikálně-mechanických vlastností povrchové vrstvy – tvrdost (mikrotvrdost), zpevnění,
- zbytkové napětí pod obrobeným povrchem,
- fyzikálně chemický stav povrchu.³¹

2.1.1 Makrogeometrie obrobené plochy

Makrogeometrii ovlivňuje:

- nepřesnost obráběcího nástroje:
 - geometrická (je dána odchylkami od předepsané vzájemné polohy funkčních částí stroje),
 - kinematická (je charakterizována odchylkami skutečné dráhy mechanismů stroje od jejich ideálních drah),
 - dynamická (je dána odchylkami vzájemné polohy uzlů stroje při zatížení reznými silami).
- nepřesnost nástroje (opotřebení řezné hrany, tvar nástroje, řezná geometrie, řezné odpory, nepřesnosti způsobené nepřesným nastavením nástroje na rozměr atd.),
- nepřesnost použitých přípravků (nepřesnosti přípravku při vymezené vzájemné polohy nástroje a obrobku, deformace obrobku způsobené upínacími silami, deformace vlastního přípravku působením rezných sil atd.).³¹

2.1.2 Mikrogeometrie obrobené plochy

Obrobená plocha se tvoří jako obálková plocha trajektorie pracovního pohybu řezné hrany nástroje a od základních geometrických ploch určených strojnickým výkresem, tj. od roviny, válcové nebo jiné geometrické plochy se podstatně liší.³¹

Mikrogeometrii (drsnost) povrchu ovlivňuje:

- geometrie řezné části nástroje,
- plastická deformace při tvorbě třísky,
- řezné podmínky procesu obrábění,
- tření řezného klínu o obrobenou plochu.

2.1.3 Zpevnění povrchu při obrábění

Zpevnění povrchu je vlastně vnější projev plastické deformace. Zpevnění je charakterizováno jako zvýšený odpor krystalické stavby kovové hmoty proti pohybu dislokací jako nositelů plastické deformace. Všechny jevy, které brání pohybu dislokací, zvyšují zpevnění.

Příčiny vzniku deformací pod obrobenými povrchy je možno hledat ve skutečnosti, že řezný klín nástroje není nikdy ideálně naostřený. Mechanismus tvorby zpevněné vrstvy vychází z mechanismu tvorby třísky.

Na zpevnění povrchu má vliv:

- vlastnosti obráběného materiálu – druh krystalické mřížky:
 - hexagonální mřížka (malý počet kluzových rovin, malá deformace před porušením),
 - kubická plošně centrovaná mřížka (velký počet rovin s možností kluzového posunutí, velká plastická deformace před porušením),
 - kubická prostorově centrovaná mřížka (tvoří přechod mezi oběma předchozími případy),
 - řezné podmínky (řezná rychlost, posuv, hloubka řezu).³¹

2.1.4 Zbytková napětí pod obrobeným povrchem

Zbytková napětí jsou jedním z projevu použitých technologií obrábění, zůstávají v součástkách a konstrukcích po výrobním procesu a působí i bez vnějšího zatížení. Zbytková napětí ovlivňují funkčnost obrobených povrchů.

Příčiny vzniku zbytkového napětí jsou:

- nerovnoměrná plastická deformace vyvolaná silovým účinkem řezného klínu,
- nerovnoměrné teplotní ovlivnění (ohřev nebo chlazení) obrobku,
- nerovnoměrná fázová transformace nebo vyloučení nových strukturních vložek.³¹

2.1.5 Fyzikálně chemický stav povrchu – struktura povrchových vrstev

Fyzikálně chemický stav obrobených povrchů má dost velký význam především pro broušené povrchy a povrchy získané speciálními dokončovacími metodami. Strukturní stavy povrchových vrstev po obrábění jsou různorodé a dosud ještě značně neprobádané. Například při soustružení nebo frézování, tj. při použití nízkých a středních řezných rychlostí, v povrchových vrstvách dochází k výrazným fázovým změnám. V povrchových vrstvách broušených ploch, tj. při vysokých řezných rychlostech, je možno registrovat fázové změny.³¹

2.2 Porovnání drsnosti jednotlivých dokončovacích ploch

Dokončovací metoda	Stupeň přesnosti IT	Drsnost povrchu Ra [μm]	Přídavek na obrábění [mm]	Rychlost obrábění [m.min ⁻¹]
Jemné soustružení	5 až 7	0,2 až 0,8	0,3 až 0,04	30 až 1000
Jemné frézování	6 až 8	0,2 až 1,6	0,2	400
Honování	5 až 7	0,05 až 0,8	0,06 až 0,2	15 až 32
Lapování	1 až 3	0,02 až 0,4	0,05 až 0,03	5 až 30
Válečkování	6 až 7	0,1 až 0,4	0,005 až 0,02	10 až 30
Broušení	3 až 6	0,05 až 0,40	0,2 až 0,4	30 až 100

Tabulka č. 3 – Porovnání dokončovacích metod³²

Z tabulky lze vyčíst, že ze všech zmíněných dokončovacích metod má metoda lapování nejnižší drsnost povrchu. Pomocí této metody tedy lze docílit nejlepší kvality povrchu. Naopak nejhorší ze zmíněných metod je na tom jemné frézování.

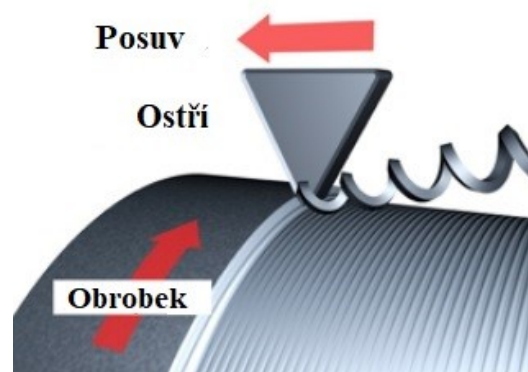
3 Tváření povrchu diamantovým nástrojem (válečkování, hlazení)

3.1 Kvalita obrobku

Jakýkoliv povrch vytvořený řezáním vykazuje typickou strukturu vzniklou v důsledku geometrie a posuvu řezné hrany. Tento tvar povrchu je pro výsledek procesu válečkování zásadní.

Povrchy vytvořené geometricky definovanými řeznými hranami, např. soustružením:

- konstantní pravidelný profil,
- konstantní drsnost,
- naznačené výstupky profilu.



Obr. 3.1 – Proces soustružení²⁰

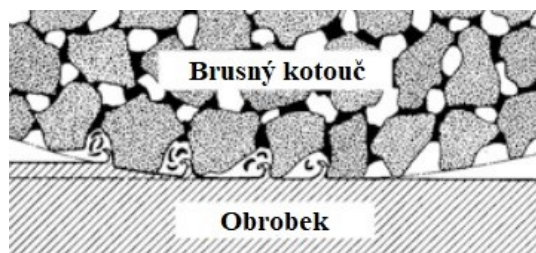
Výsledkem jsou velmi stabilní podmínky pro válečkování.²⁰



Obr. 3.2 – Typický povrch vytvořený geometricky definovanými řeznými hranami²⁰

Povrchy vytvořené geometricky nedefinovanými řeznými hranami, např. broušením:

- nepravidelný profil,
- nízká drsnost s rýhami,
- tvorba plošek.



Obr. 3.3 – Proces broušení²⁰

Výsledkem jsou vyšší síly a opotřebení během válečkování.²⁰



**Obr. 3.4 – Typický povrch vytvořený geometricky
nedefinovanými řeznými hranami ²⁰**

3.2 Vlastnosti materiálu

3.2.1 Pevnost

Pevnost představuje schopnost materiálu odolávat aplikované síle.

Pevnost kovových materiálů určuje především krystalová mřížka a její struktura (chyby struktury mřížky). Mimo to je pevnost materiálu ovlivněna také napětím.²⁰

3.2.2 Tvrdost

Tvrdost popisuje schopnost materiálu odolávat vůči vtlačování – tj. kompresím v povrchu materiálu způsobenými nárazy. Jedním z pozitivních výsledků použití technologie válečkování je právě zvýšená tvrdost povrchu.²⁰

a) Zpevňování pomocí mechanických metod

Zpevňování pomocí mechanických metod je založeno na následujících parametrech:

- mechanické zpevnění za studena zvýšením hustoty dislokací, která je způsobena tvorbou nových dislokací během plastické deformace materiálu,
- tvorba zbytkového napětí v povrchové vrstvě, vnitřní napětí v tlaku způsobené roztahováním povrchu, které je kompenzováno spodní vrstvou materiálu,
- mechanicky vyvolaná změna mikrostruktury,
- snížení vrubového efektu zlepšením kvality povrchu.²⁰

b) Přetvoření materiálu

• Statické zatížení

Jedná se o konstantní sílu působící na materiál v důsledku tahu, tlaku nebo krutu.

Dovolená zatížení materiálu, od plastické deformace až do přetržení, lze předvídat z vlastností materiálu (pracovní diagram zkoušky tahem) a případu zatížení.

- **Dynamické zatížení**

Toto je síla opakovaně působící na materiál v důsledku tahu, tlaku nebo krutu. V případě dynamického zatížení je mez zatížení mnohem nižší než u statického zatížení. Při tlakovém zatížení se pak definuje charakteristika materiálu. Ta je pak zachycena v tzv. S-N (Wöhlerově) křivce. Oblast prasknutí bývá často v místě změny průměru, jelikož zde dochází k vrcholu napětí materiálu. Důvodem prasknutí způsobených vrubovým efektem bývají také oblasti s vysokou drsností povrchu.²⁰

3.3 Podstata a cíl válečkování

Válečkování je beztržisková metoda hlazení a zpevňování kovových povrchů pomocí tvářecích prvků. Během válečkování jsou tvářecí prvky přitlačovány silou působící svisle k válečkovanému povrchu (válečkovácí síla). Tím dochází k plastické deformaci a vyrovnaní profilu drsnosti. Válečkováním také měníme podmínky napětí v povrchové vrstvě materiálu. Je to metoda konečné povrchové mikroúpravy.²⁰

3.3.1 Hlazení materiálu válečkováním

Válečkovácí síla vytváří styčný tlak v místě kontaktu plochy a válečkovacích prvků. Tím je ve stykové ploše dosaženo meze toku a dochází k plastické deformaci a vyrovnaní povrchového profilu. Objem materiálu ve vyvýšených oblastech výstupků profilu je zatlačován do prohlubní. Tím dochází k výraznému snížení drsnosti povrchu. Výsledný rozměrový rozdíl mezi předběžně tvářeným a válečkováným obrobkem závisí na původní drsnosti. U válečkovácí síly za účelem dosažení kvalitního povrchu se používá menších hodnot přitlaku. Preferovaným cílem celého procesu válečkování je kvalita povrchu spíše než jeho zpevnění.²⁰

Výhody a nevýhody:

- hladký povrch s drsností nižší než 1 μm ,
- vysoký materiálový poměr profilu vytvářející optimalizované charakteristiky opotřebení,
- snížené riziko tvorby prasklin vzniklých v důsledku mikrovroubků,

- zvýšená odolnost vůči korozi,²⁰
- není možné použití pro přerušovaný řez (hrozí vylomení diamantové špičky),
- pro velké plochy hrozí rychlé opotřebení (vysoká cena diamantové špičky),
- oproti broušení je nutno dbát na opracovaný povrch před hlazením.

3.3.2 Zpevňování hlubokým válečkováním

Během hlubokého válečkování dochází ke stejnému pohybu jako u běžného válečkování. Cílem je ale zpevnění materiálu. Z toho důvodu je v tomto případě použit vyšší valivý tlak. Vznikají pak následující efekty:

- zpevnění způsobené dislokačními pohyby v krystalové struktuře materiálu,
- vznik stavu napětí v povrchové vrstvě (k tomu dochází v důsledku interakce plastického roztahování povrchu, které je kompenzováno pružnou deformací hraniční vrstvy),
- mechanicky zapříčiněná změna mikrostruktury,
- zlepšení kvality povrchu a snížení vrubového efektu.²⁰

a) Vlastnost povrchů upravených válečkováním

Povrchy, které jsou upravené metodou válečkování charakterizují následující vlastnosti:

- velmi vysoký materiálový poměr profilu způsobený tvorbou plošek,
- velmi nízké hodnoty drsnosti,
- snížené výstupky profilu,
- zvýšená dynamická pružnost způsobená výrazným zpevněním,
- zvýšená tvrdost povrchu snižuje opotřebení otěrem.²⁰

b) Vlastnosti válečkovaných materiálů

Válečkovat lze každý kov, který je plasticky deformovatelný. Standartní válečkovací nástroje s ocelovými válečky lze použít při tvrdosti materiálu až do 45 HRC. Při použití diamantových hladících nástrojů smí tvrdost materiálu překročit 60 HRC.

Válečkovatelnost je definována schopností materiálu se plasticky deformovat. Indikátorem je tažnost materiálu, která by měla být vyšší než 5 %. Vyšší hodnota tažnosti zlepšuje válečkovatelnost.²⁰

3.4 Druhy válečkových nástrojů

- víceválečkové nástroje a stroje,
- jednoválečkové/jednokotoučové nástroje,
- diamantové nástroje,
- tvářecí nástroje.²⁰

3.5 Využití válečkových nástrojů

3.5.1 Požadavky na stroje

Válečkovací (hladící) nástroje jsou vhodné pro všechny běžné typy strojů, jako například:

- soustruhy, konvenční stroje i CNC,
- obráběcí centra,
- postupové linky,
- vícepolohové stroje s otočným stolem,
- vrtací stroje, frézy atd.²⁰

3.5.2 Použití nástrojů

Válečkovací (hladící) nástroje se používají téměř ve všech kovodělných odvětvích, např. v automobilovém průmyslu, ve výrobě hydraulických a pneumatických dílů, ve zdravotnickém průmyslu, v leteckém průmyslu, ve strojírenství nebo i ve výrobě šperků.²⁰

3.5.3 Nástrojové stopky a možnosti upnutí

K dispozici jsou všechny běžné upínací systémy, například:

- VDI – DIN 69880,
- SK – DIN 69871, DIN 2080,

- HSK DIN 69893.

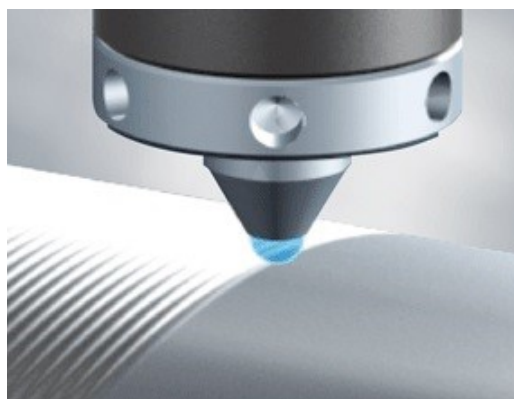
3.5.4 Chlazení/mazání

Všeobecně je pro válečkování v dostačující mazání malým množstvím řídkého oleje, především při manuálním provozu. Při vysokých rychlostech či tlacích válečkování je v zájmu zvýšení životnosti nástroje vhodné nepřetržité chlazení emulzí nebo řezným olejem.

Chladicí/mazací kapalina slouží také k odstraňování nečistot z povrchu a je třeba ji udržovat co nejčistší, aby nedocházelo k vtlačování nečistot do povrchu.

3.6 Charakteristika operace hlazení

Operace hlazení je dokončovací operace povrchu odpruženým (diamantovým) hrotem. Díky menší kontaktní ploše mezi nástrojem a součástí než u klasického válečkování, dosahuje plastické deformace za studena při působení nižších sil.¹



Obr. 3.5 – Vyhlazování a deformační zpevnění vnitřního obrysu pomocí nástroje na hlazení diamantem ²⁰

3.7 Obecné výhody hlazení diamantem

Výhody

- dosažení drsnosti povrchu pod 1 μm ,
- maximální jistota procesu,
- zvýšené meze únavy a únosnosti,
- větší odolnost součástí proti opotřebení a korozi,



Obr. 3.6 – Diamant ¹

- zvýšené povrchové vrstvy materiálu,
- nevzniká prach při dokončovacích operacích – metoda je beztržisková.¹

Nevýhody hlazení jsou souhlasné jako v kapitole 3.3.1.

3.8 Chlazení diamantu

Jako důležitý předpoklad pro práci s diamantem je jeho chlazení. Pokud chlazení není dostatečně zajištěno, může dojít k nenapravitelnému poškození diamantu. Dostatečné a okamžité chlazení je bezpodmínečná podmínka pro technologii hlazení povrchu diamantem.

Během tváření materiálu dochází ke zvýšení teploty. Vzhledem k dobré tepelné vodivosti diamantu je teplo odvedeno z povrchu zpracovávaného materiálu až po matrici, ve které je diamant uložen. Matrice má stejnou vodivost jako materiál součásti, proto dochází ke snížení odvodu tepelné energie, která se hromadí právě na přechodu z diamantu do kovové matrice.¹



Obr. 3.7 – Chlazení a mazání²⁰

3.9 Konstrukční provedení nástrojů

- U těchto nástrojů neprobíhá proces hlazení pomocí rotujících válečků, ale pomocí pevného, kulovitého diamantu, diamant se posouvá po povrchu.
- Díky bodové stykové ploše a úzkému designu diamantového nástroje lze opracovávat široké spektrum různých tvarů.
- Diamantem lze vyhlazovat například tenkostěnné díly.

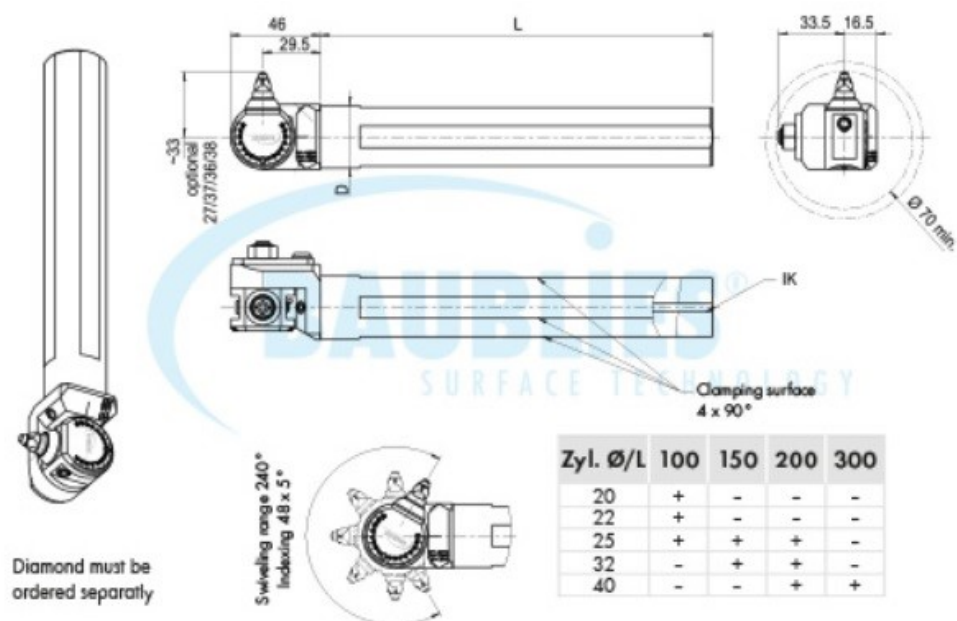
- Konstrukce nástroje obsahuje výhradně mechanické součásti, díky čemuž lze nástroj použít téměř na všech obráběcích strojích.
- Možnosti konstrukce a vynikající materiálové vlastnosti diamantu výrazně rozšiřují možnosti využití válečkování.
- Úzký design umožňuje použití v obráběcích strojích malých rozměrů.
- Enormní tvrdost diamantu navíc umožňuje obrábění materiálů s tvrdostí vyšší než 60 HRC.
- Dle požadavků obrobku lze přizpůsobit tvar diamantu, a to od proměnného poloměru až po kužely a pyramidy.
- Lze navíc kombinovat diamantový hladicí nástroj s řezacími nástroji.²⁰

3.9.1 Diamantový hladicí nástroj, variabilní vnitřní

Tyto nástroje nejsou určeny jen pro jeden specifický tvar. Jelikož je diamant natáčecí, jsou tyto nástroje víceúčelové. Lze je použít k uhlazování, zpevňování vnitřních tvarů součástí a hřídelí.²⁵



Obr. 3.8 – Obráběné plochy variabilním vnitřním nástrojem ²⁵



Obr. 3.9 – Technická specifikace ²⁵

Použití	Otvory a vnitřní kontury
Standardní přípravek	Válcová stopka \varnothing 20/22/25/32/40 mm
Rozsah rejdu	210°
Indexování	42 x 5°

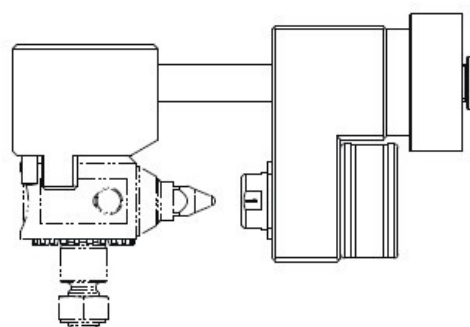
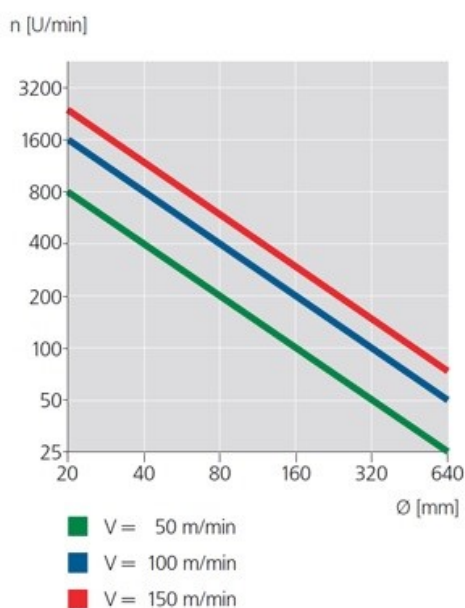
Tabulka č. 4 – Technické údaje ²⁵

Rychlost	až 150 m/min
Posuv	0,05 – 0,2 mm/ot.
Přídavek na obrobku	až 0,02 mm
Předpětí nástroje	až 1 mm
Mazání	emulze nebo olej; filtrace maziva může zlepšit kvalitu povrchu a životnost nástroje
Předpracování obrobku	drsnost povrchu až 15 μ m

Tabulka č. 5 – Parametry – standardní hodnoty ²⁵

Výhody nástroje:

- univerzální použití,
- pružné uložení diamantu,
- možnost výměny diamantové vložky,
- možnost přebroušení diamantu,
- úzký design nástroje umožňuje použití pro malé rozměry,
- vhodné pro obrábění velmi tvrdých kovů a tenkostěnných obrobků.²⁵



Obr. 3.11 – Montážní zařízení (možnosti)²⁵

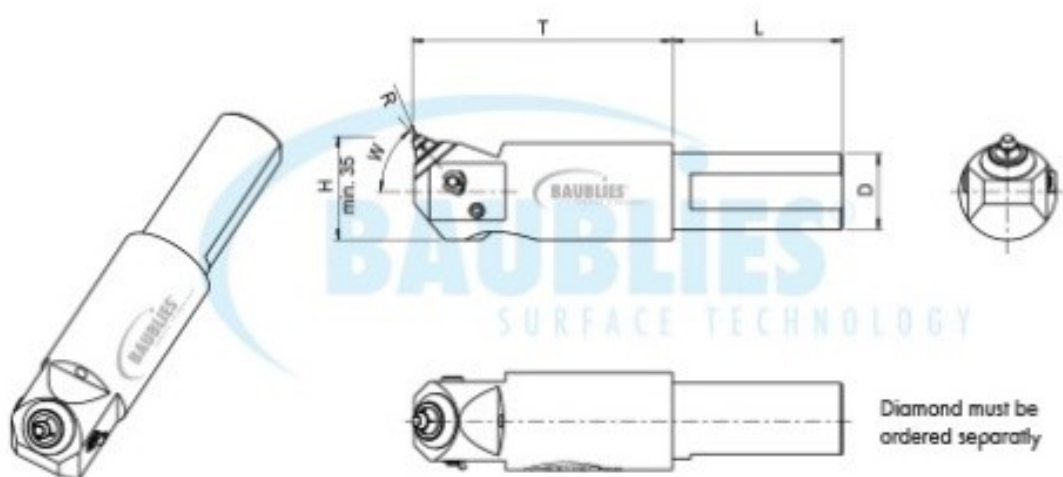
Obr. 3.10 – Graf závislosti otáček na průměru, vypočtený z rychlosti²⁵

3.9.2 Diamantový hladicí nástroj pro vnitřní obrábění

Tyto nástroje nejsou určeny jen pro jeden specifický tvar. Lze je použít k uhlazování, zpevňování otvorů a vnitřních tvarů součástí.²⁶



Obr. 3.12 – Obráběné plochy vnitřním diamantovým nástrojem²⁶



Obr. 3.13 – Technická specifikace ²⁶

Použití	Otvory a vnitřní kontury
Standardní přípravek	Válcová stopka \varnothing 20/25/32/40 mm
Rozsah rejdu	210°
Indexování	42 x 5°

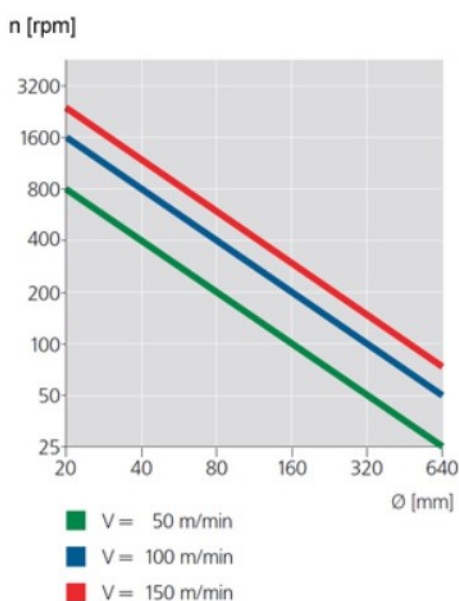
Tabulka č. 6 – Technické údaje ²⁶

Rychlost	až 150 m/min
Posuv	0,05 – 0,2 mm/ot.
Přídavek na obrobku	až 0,02 mm
Předpětí nástroje	až 1 mm
Mazání	emulze nebo olej; filtrace maziva může zlepšit kvalitu povrchu a životnost nástroje
Předpracování obrobku	drsnost povrchu až 15 μ m

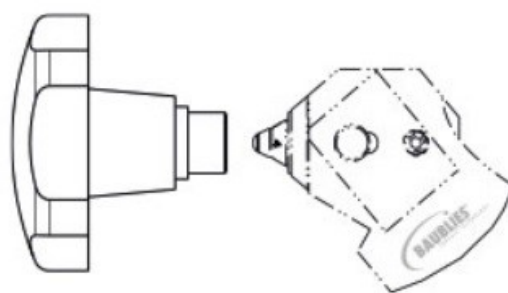
Tabulka č. 7 – Parametry – standardní hodnoty ²⁶

Výhody nástroje:

- univerzální použití,
- pružné uložení diamantu,
- možnost výměny diamantové vložky,
- možnost přebroušení diamantu,
- úzký design nástroje umožňuje použití pro malé rozměry,
- vhodné pro obrábění velmi tvrdých kovů a tenkostěnných obrobků.²⁶



Obr. 3.14 – Graf závislosti otáček na průměru, vyplyne rychlost²⁶



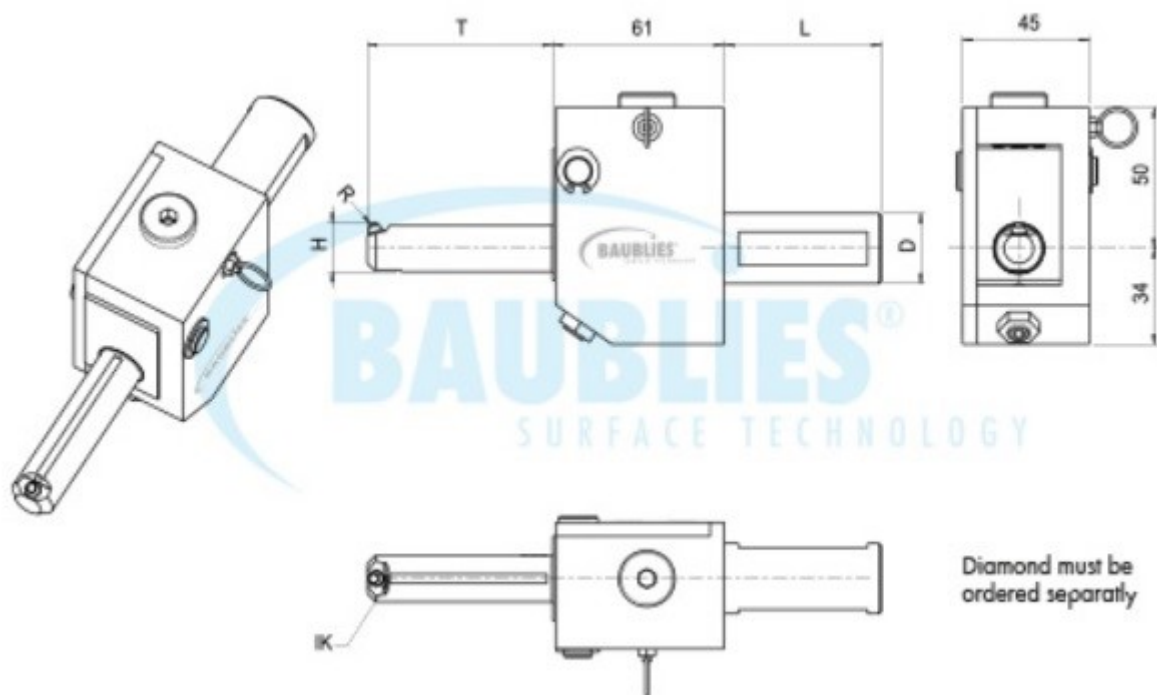
Obr. 3.15 – Montážní zařízení²⁶

3.9.3 Diamantový hladicí nástroj pro vnitřní obrábění se základním tělesem

Tyto nástroje nejsou určeny jen pro jeden specifický tvar a lze je použít k uhlazování, zpevňování otvorů a vnitřních tvarů součástí.²⁷



Obr. 3.16 – Obráběné plochy vnitřním diamantovým nástrojem²⁷



Obr. 3.17 – Technická specifikace ²⁷

Použití	Otvory a vnitřní kontury
Standardní přípravek	Válcová stopka \varnothing 20/25/32/40 mm

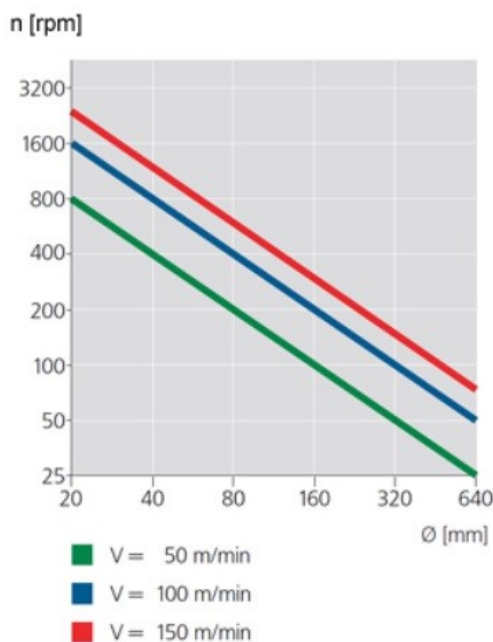
Tabulka č. 8 – Technické údaje ²⁷

Rychlost	až 150 m/min
Posuv	0,05 – 0,2 mm/ot.
Přídavek na obrobku	až 0,02 mm
Předpětí nástroje	až 1 mm
Mazání	emulze nebo olej; filtrace maziva může zlepšit kvalitu povrchu a životnost nástroje
Předpracování obrobku	drsnost povrchu až 15 μ m

Tabulka č. 9 – Parametry – standardní hodnoty ²⁷

Výhody nástroje:

- univerzální použití,
- pružné uložení diamantu,
- možnost výměny diamantové vložky,
- možnost přebroušení diamantu,
- úzký design nástroje umožňuje použití pro malé rozměry,
- vhodné pro obrábění velmi tvrdých kovů a tenkostěnných obrobků.²⁷



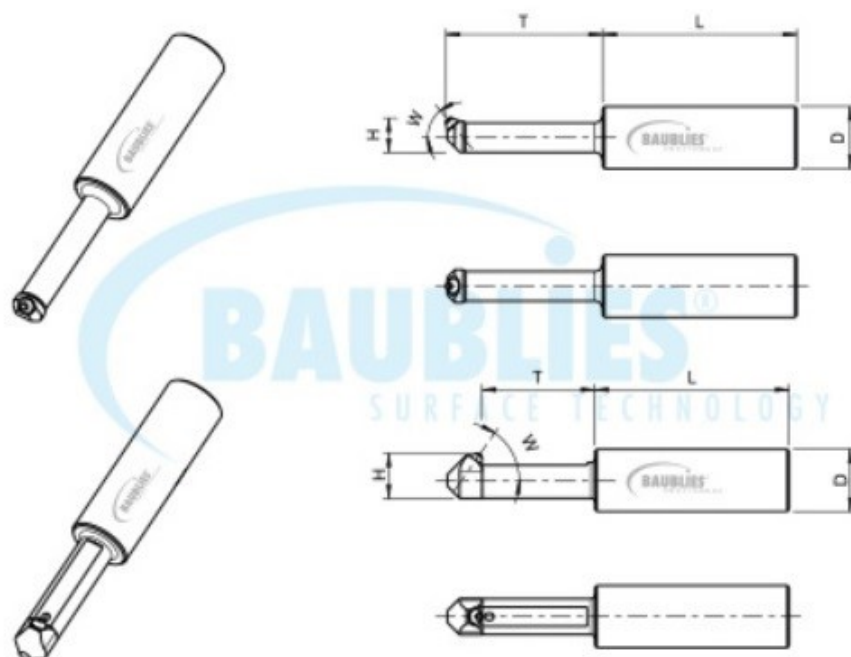
Obr. 3.18 – Graf závislosti otáček na průměru, vyplyne rychlost ²⁷

3.9.4 Diamantový hladící nástroj pro vnitřní obrábění, zvýšená tuhost

Tyto nástroje nejsou určeny jen pro jeden specifický tvar (pevné, ne pružinové) a lze je použít k uhlazování, zpevňování otvorů a vnitřních tvarů součástí.²⁸



Obr. 3.19 – Obráběné plochy vnitřním diamantovým nástrojem ²⁸



Obr. 3.20 – Technická specifikace ²⁸

Použití	Otvory od \varnothing 4 mm a vnitřní kontury
Standardní přípravek	Válcová stopka \varnothing 6 mm (v případě potřeby s upínacím povrchem)
Délka „L“	Dle potřeby

Tabulka č. 10 – Technické údaje ²⁸

Rychlost	až 150 m/min
Posuv	0,05 – 0,2 mm/ot.
Přídavek na obrobku	až 0,015 mm
Předpětí nástroje	až 1 mm
Mazání	emulze nebo olej; filtrace maziva může zlepšit kvalitu povrchu a životnost nástroje
Předpracování obrobku	drsnost povrchu až 6 μ m

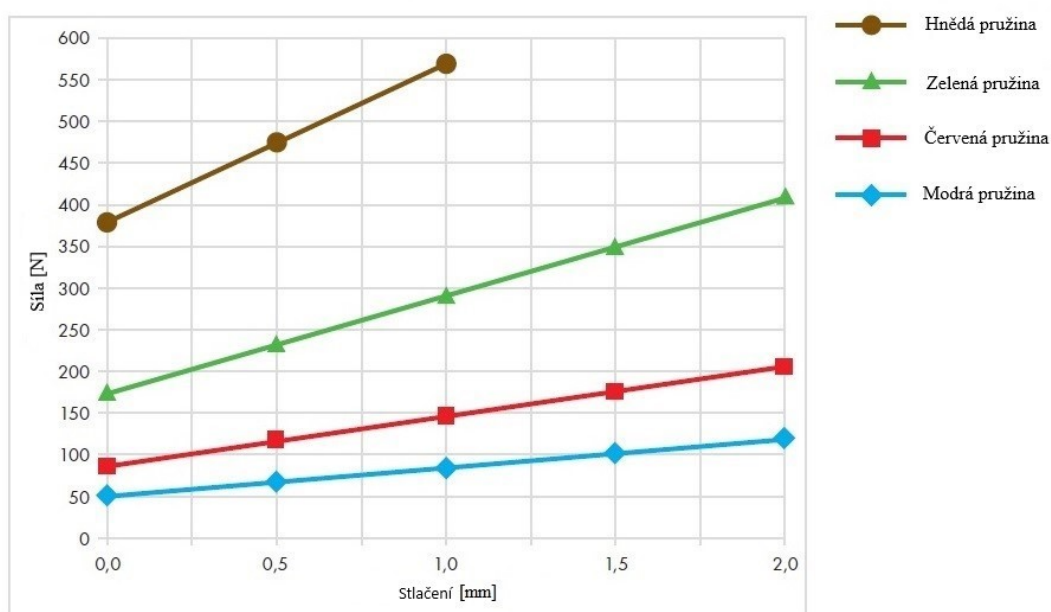
Tabulka č. 11 – Parametry – standardní hodnoty ²⁸

Výhody nástroje:

- univerzální použití,
- pružné uložení diamantu,
- možnost výměny diamantové vložky,
- možnost přebroušení diamantu,
- úzký design nástroje umožňuje použití pro malé rozměry,
- vhodné pro obrábění velmi tvrdých kovů a tenkostěnných obrobků.²⁸

3.10 Přítlak hrotu pomocí pružiny

Přítlak diamantového hrotu k obráběnému materiálu může být prováděn například pomocí pružin. Běžně se v praxi používá několik tuhostí pružin, které jsou pro jednoduchou identifikaci barevně odlišeny, každá barva znázorňuje jinou tuhost. Díky možnosti výměny pružiny se rozšiřuje univerzálnost použití nástroje.



Graf č.1 – Klasifikační síla – průhyb pružiny – závislost mezi silou [N] a stlačením [mm]

Pro představu dle grafu:

- při montáži červené pružiny stlačení obrobku 0,25 mm generuje sílu přibližně 100 N.

V závislosti na vlastnostech materiálu se doporučuje použití pružiny. Níže uvedená tabulka by měla sloužit jako vodítko pro zvolení správné tuhosti pružiny. Obvykle se používá stlačení 0,5 mm.

Je-li vyžadována vyšší síla, je zapotřebí použít silnější pružinu. Z tabulky plyne, že pružina označená modrou barvou má nejnižší tuhost, naopak hnědá pružina má nejvyšší tuhost.

Barva pružiny	Označení	Síla	Až do pevnosti v tahu
Modrá 	13798	50 - 120 N	400 MPa [N/mm ²]
Červená 	13799	90 - 200 N	1250 MPa [N/mm ²] nebo HRC 40
Zelená 	13800	180 - 400 N	HRC 64
Hnědá 	13801	380 - 570 N	Používá se jen ve pouze ve velmi speciálních aplikacích

Tabulka č. 12 – Návrh aplikace pružiny podle vlastností materiálu

4 Konstrukční návrh nástroje

Tato kapitola se zabývá vhodným konstrukčním návrhem nástroje pro dokončování vnitřních válcových ploch. Jako tvářecí tělísko je použit diamant.

Povrch obráběného materiálu před nástupem hlazení diamantem by měl být rovnoměrně opracován, bez jakýkoliv vad či rýh. Teprve poté bude mít povrch správné hodnoty a správnou požadovanou drsnost.

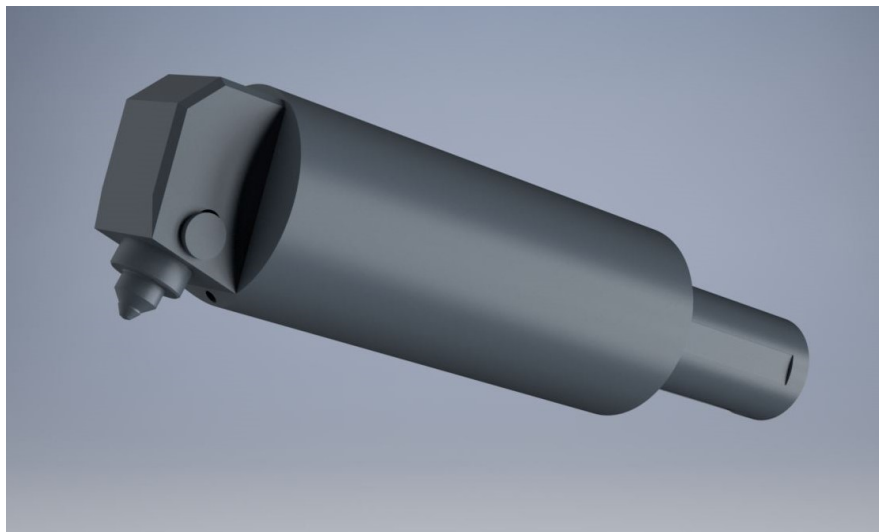
Dosahovaná drsnost povrchu pomocí hlazení je $R_a = 0,2 \mu\text{m}$. Obrobek s dírou o velikosti $\varnothing 70$ mm a délce 400 mm, která je vysoustružená, má drsnost vnitřního povrchu $R_a = 3,2 \mu\text{m}$.

Hladicí nástroj se skládá z těchto hlavních částí:

- tělo nástroje,
- hlava nástroje – zde je usazeno tvářecí tělísko (diamant),
- spojovací čep,
- pružina.

4.1 Návrh nástroje (program Autodesk Inventor Professional 2019)

Dokončovací diamantový nástroj byl navržen tak, aby byl schopen dokončovat díry malých rozměrů. Je vhodný pro obrábění velmi tvrdých kovů a tenkostěnných obrobků.



Obr. 4.1 – 3D návrh nástroje

4.2 Obrobek, hlavní části nástroje

4.2.1 Obrobek

Pro obrobek jsem zvolila středně legovanou ušlechtilou ocel 18CrNiMo7-6. Po zakalení dosahuje tvrdosti přibližně 58 HRC. Jelikož má obrobek takto vysokou pevnost, je ideální pro dokončení diamantem, dosáhne se žádoucího účinku.

4.2.2 Tělo nástroje

Pro tuto část hladícího nástroje jsem zvolila ušlechtilou konstrukční mangan-chromovou ocel k cementování 14 220.

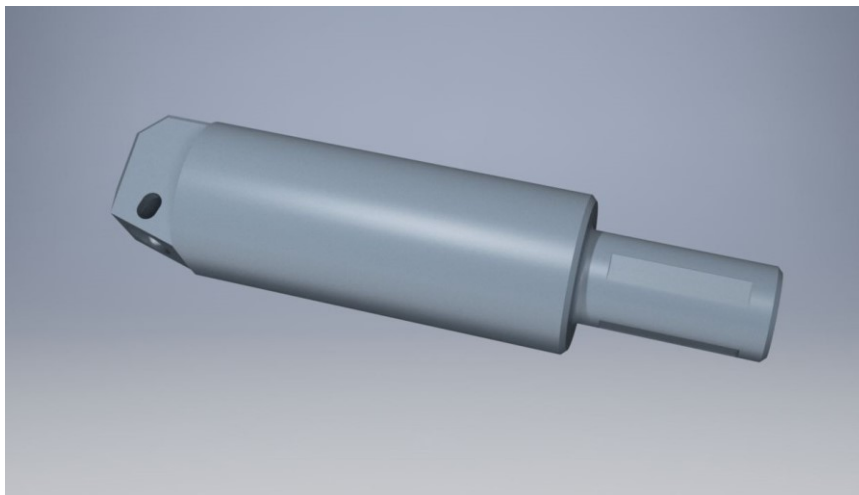
Ocel je dobře tvářitelná za tepla, po žíhání naměkko i za studena je dobře obrobitelná (pro hladké obrábění se doporučuje ocel zušlechtěná na pevnost 690 až 880 MPa). Je dobře svařitelná a je také vhodná pro strojní součásti pro zušlechtění do průměru 35 mm k cementování s velmi tvrdou cementovanou vrstvou s velkou pevností v jádře.³⁴

Skrze celé tělo nástroje prochází otvor, který vede až k místu, kde diamant přichází do kontaktu s obrobkem. Tato díra slouží k přívodu chladicí kapaliny až na místo styku.

Okamžité a dostatečné chlazení je pro technologii hlazení povrchu diamantem bezpodmínečná podmínka. Jakmile tyto podmínky nejsou splněny, může docházet k nenapravitelnému poškození hrotu.¹

Abychom zabránili zmíněným chybám a nedostatkům, je potřeba zvolit správné chladicí medium. Dle podkladů je vhodné pro dokončování diamantem volit buď chladicí emulzi nebo chladicí olej.

Jak už bylo v dřívější kapitole zmíněno, k dispozici pro tyto nástroje jsou běžné upínací způsoby, jako např. SK, VDI, HSK. Volím upnutí VDI.



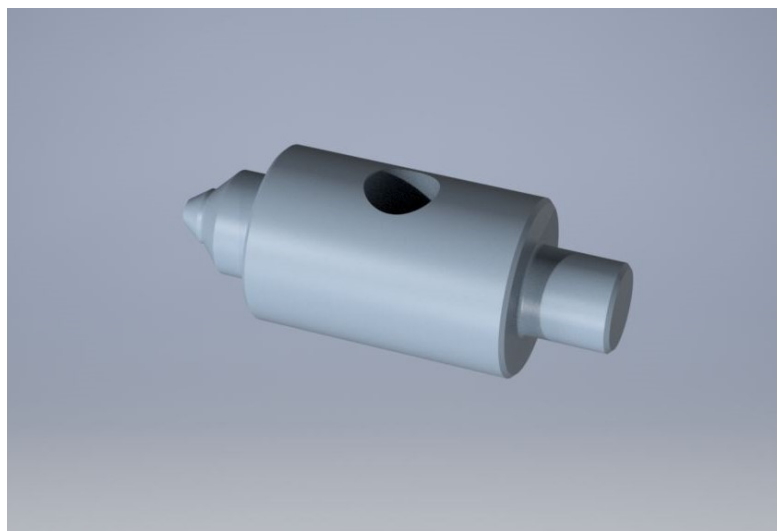
Obr. 4.2 – Tělo nástroje

4.2.3 Hlava nástroje

Pro tuto část nástroje jsem zvolila materiál 42CrMo4. Je to konstrukční ocel s vyšší prokalitelností pro namáhané strojní díly. Po zakalení dosahuje tvrdosti přibližně 58 HRC.

36

Hlava nástroje je část, ve které je usazeno diamantové tělísko. Jakmile bude potřeba diamant či pružinu vyměnit, bude se vytahovat celá hlava, která je v těle nástroje vsunutá. Pokud by bylo uchycení jinak, např. závitem, mohlo by při časté výměně zbytečně docházet k opotřebovávání všech částí.



Obr. 4.3 – Hlava nástroje

4.2.4 Spojovací čep, diamant

Pro malý spojovací čep, díky kterému upneme hlavu nástroje do těla nástroje, jsem zvolila také materiál 42CrMo4. Tento čep prochází skrze hlavu nástroje, ve které je pro něj vyvrtaná díra s průměrem o něco větší, než je průměr čepu. Během procesu hlazení vzniká vysoká teplota, díky které se materiál může rozpínat.

Diamant, jakožto hladící tělísko uchycené v hlavě nástroje, je nejdůležitější část nástroje, díky které dosahujeme nízké požadované drsnosti povrchu. Čím menší má diamant poloměr špičky, tím je drsnost lepší. Já jsem zvolila poloměr špičky 2 mm.

4.2.5 Pružina nástroje

Další důležitou částí v nástroji je pružina. Je to součást, díky které se diamant stává pružně uloženým, což má na dokončování velice velký a kladný vliv. Já jsem pro nástroj zvolila pružinu zelené barvy.

4.3 Vlastnosti použitých materiálů

4.3.1 Konstrukční ocel 14 220

Tato nízkolegovaná ušlechtilá mangan-chromová ocel k cementování je nejčastěji používaná cementační ocel pro středně namáhané díly strojů a motorových vozidel. Prokaluje do hloubky zhruba 30 mm. Je tepelně zpracovaná a také dobře tváritelná za studena. Přísadou bóru se docílí zvýšené houževnatosti cementované vrstvy.³⁷

Označení oceli

16MnCr5 (16MnCrS5)

1.7131 (1.7139)

DIN 17 210

ČSN 14 220

Tabulka č. 13 – Různé označení oceli ³⁷

Chemické složení v % hmot. (rozbor tavby)	C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cr	Mo	Ni	Al
	0,14		1,00						Při kontrolované velikosti
	-	0,40	-	0,035	0,035	0,80-1,10	-	-	austenitického zrna 0,015-0,050
	0,19		1,30						

Tabulka č. 14 – Chemické složení v procentech hmotnosti ³⁷

Způsob	Teplota [°C]
kování	1100 až 800
Normalizační žíhání	850 až 880
Žíhání na měkko	680 až 720
Cementování	840 až 900
1. kalení do oleje	840 až 870
Mezižíhání	650 až 680
2. kalení do oleje	810 až 830
Jednoduché kalení do oleje	820 až 840
Popouštění	150 až 180

Tabulka č. 15 – Tepelné zpracování oceli 14 220 ³⁴

4.3.2 Konstrukční ocel 15 142

Tato nízkolegovaná ušlechtilá chrom-molybdenová ocel k zušlechťování patří mezi nejčastěji používané oceli k zušlechťování. Do průměru 100 mm lze po zušlechťování docílit pevností nad 1000 MPa při ještě dostatečné houževnatosti. Ocel není náchylná k popouštění křehkosti. Kalí se do méně razantního kalicího prostředí, poněvadž je náchylná ke vzniku kalicích trhlin v místech s vrubovým účinkem nebo povrchových vad. V kaleném stavu dobře odolává opotřebení.³⁶

Označení oceli
42CrMo4 (42CrMoS4)
1.7225 (1.7227)
DIN 17 200
ČSN 15 142

Tabulka č. 16 – Různé označení oceli ³⁶

Chemické složení v % hmot. (rozbor tavby)	C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cr	Mo	Ni	V
	0,38- 0,45	0,40 max.	0,6,- 0,90	0,025 max.	0,035 max.	0,90- 1,20	0,15- 0,30	-	-
Složení hotového výrobku	0,36- 0,47	0,43 max.	0,56- 0,94	0,030 max.	0,040 max.	0,85- 1,25	0,12- 0,33	-	-

Tabulka č. 17 – Chemické složení v procentech hmotnosti a složení hotového výrobku ³⁶

Způsob	Teplota [°C]
Normalizační žíhání	850 až 880
Žíhání na měkko	680 až 720
Isometrické žíhání	800 až 900
Teplota kalení	820 až 860
Teplota popouštění	540 až 680
Zkouška kalením čela	850 ± 5

Tabulka č. 18 – Tepelné zpracování oceli 15 142 ³⁶

Tváření za tepla

Doporučené rozmezí teplot pro tváření za tepla: 1100 až 850 °C

Tabulka č. 19 – Tváření za tepla oceli 15 142 ³⁶

5 Návrh vhodných technologických podmínek

Dle podkladů jsem zvolila tyto vlastnosti a řezné podmínky:

- rychlost hlazení $v_c = 50-70$ m/min,
- posuv $f = 0,1$ mm/ot.,
- dle tabulky č. 12 jsem zvolila pružinu zelené barvy.

Jako chladicí emulzi jsem zvolila EUCUT 0971.

Je to komplexní chladicí emulze speciálně vyvinutá pro nejnáročnější obráběcí procesy. Emulze je určena pro všechny typy třískového obrábění, např. uhlíkatých ocelí, litin, nerezových ocelí, hliníku. Je vhodná pro centrální systémy, CNC i konvenční stroje.

Pyšní se vynikajícími mazacími schopnostmi, životností a čistícím účinkem. Je schopna velmi dobře chránit obrobky proti korozi.³⁵

- Doporučená koncentrace: 5%
- Obsah minerálního oleje: 35 %
- Na bázi minerálních olejů a kyseliny borité.³⁵

Dle mého názoru je tato emulze velice vhodná pro dokončování diamantem.

6 Technicko-ekonomické zhodnocení

Metodu hlazení můžeme zhodnotit jako velice přínosnou, co se týče časové a ekonomické stránky. U této metody totiž odpadají manipulační operace, díky čemuž se proces časově velmi zkrátí. Odpadají také náklady na manipulaci, čímž se snižuje cena procesu. Díky diamantovému tělísku, kterým se povrch hladí, se nástroj stává dlouho použitelným. Výhoda diamantu je možnost jeho několikanásobného přebroušení.

Při opotřebení stačí vyměnit pouze diamant, nemusí se nahrazovat celý nástroj nebo hlava nástroje, ve kterém je diamant uchycen. Schopnost diamantu být několikrát přebroušen tedy šetří náklady za opětovné pořizování nového nástroje.

6.1 Cenové porovnání dokončovacích operací

	Hlazení	Soustru- žení	Broušení	Frézování	Honování	Lapování	Válečko- vání
Výrobní čas [min]	7,33	0,879	*)	*)	*)	*)	*)
Upínací čas [min]	0	5	20	10	45	40	15
Hodino- vá sazba stroje [kč/hod]	750	800	1 000	500	700	700	750
Náklady na obrábění [kč]	91,7	78,36	*)	*)	*)	*)	*)
Náklady na nástroj [kč]	60 000	1 000	300	1 000	800	500	30 000
Náklady na stroj [kč]	2 mil.	3,5 mil.	3 mil.	3,5 mil.	0,5 mil.	0,5 mil.	2 mil.

Tabulka č. 20 – Náklady dokončovacích metod

*) – Hodnoty musí být experimentálně ověřeny.

Výpočet nákladů na obrábění:

$$N = (t_{as} + t_u) * (H_s)$$

kde N je náklad na obrábění,

kde t_{as} je strojní čas,

kde H_s je hodinová sazba,

kde t_u je upínací čas.

➤ Hodnoty jsou počítány v minutách.

Náklady na obrábění hlazení:

$$N = (7,33+0) * (12,5)$$

$$N = \underline{\underline{91,7 \text{ Kč}}}$$

Náklady na obrábění soustružení:

$$N = (0,879 + 5) * (13,33)$$

$$N = \underline{\underline{78,36 \text{ Kč}}}$$

Výrobní čas hlazení:

$$t_{as} = \frac{l}{f * n} = \frac{400}{0,2 * 273} = \underline{\underline{7,33 \text{ min}}}$$

$$\text{výpočet otáček} = n = \frac{v * 1000}{D * \pi} = \frac{60 * 1000}{70 * \pi} = 273$$

$$\text{průměrná rychlost} = \frac{v_1 + v_2}{2} = \frac{50 + 70}{2} = 60$$

Výrobní čas soustružení:

$$t_{as} = \frac{l}{f * n} = \frac{400}{0,2 * 909} = \underline{\underline{2,2 \text{ min}}}$$

$$\text{výpočet otáček} = n = \frac{v * 1000}{D * \pi} = \frac{200 * 1000}{70 * \pi} = 909$$

kde l je délka obráběné plochy,

kde f je posuv za otáčku,

kde p je přídavek na obrobku,

kde n je počet otáček,

kde v je rychlost.

Tabulka č. 20 pojednává o časové náročnosti a nákladech pro výrobní proces u několika vybraných dokončovacích metod. Při hlubší úvaze vyplývá, že mít u všech odvětvích u dané metody nejnižší hodnotu neznamena, že je daná metoda nejvýhodnější. Řeč je hlavně o metodě hlazení, kdy je částka za nástroj dosti vysoká. Díky možnosti několikanásobného přebroušení diamantu se ale nástroj po prvotní investici stává na dlouhou dobu beznákladový. To je dosti velká peněžní úspora.

Závěr

Zadáním této bakalářské práce bylo zmínit dokončovací operace způsobilé pro vnitřní válcové plochy. Hlavním úkolem práce bylo podrobně popsat metodu hlazení diamantovým nástrojem a navrhnout konstrukci tohoto nástroje.

Teoretická část práce je zaměřená na rozbor dokončovacích operací pro obrábění vnitřních válcových ploch. Každá metoda dokončení je obecně popsána, co tato metoda obnáší, jaké má výhody a nevýhody, jaké jsou možnosti pro použití strojů, nástrojů a tak podobně.

Další bod, který je v teoretické části řešen, je integrita povrchu. Tento pojem je v textu podrobně popsán, co vlastně pod tento název spadá a co všechno může ovlivnit povrch obrobku. Je zde i tabulka porovnání drsností u jednotlivých dokončovacích metod, díky které lze snadno určit, která metoda má nejlepší, a naopak nejhorší drsnost po dokončení povrchu obrobku.

V následující praktické části je text podrobně věnován metodě válečkování, a hlavně metodě hlazení diamantovým nástrojem. Jsou zde popsány vlastnosti materiálů, výhody, nevýhody, vlivy či podmínky, které mohou ovlivňovat dosažení požadované drsnosti.

Následuje konstrukční návrh nástroje, který je považován za hlavní cíl této bakalářské práce. Je zde řešen návrh jednotlivých částí nástroje, včetně jejich charakteristik či volby jejich materiálů. Nástroj je navrhován jako jeden celek, aby do sebe jednotlivé části správně pasovaly. Jako hlavní pomůcka mi pro návrh nástroje posloužil počítačový software – Autodesk Inventor Professional 2019, díky kterému jsem mohla jednotlivé části vymodelovat ve 3D a následně nástroj sestavit dohromady. Sestava mi umožnila vidět celkovou podobu modelu a hlavně to, zda spolu jednotlivé díly nijak nekolidují. Z těchto 3D modelů jsem také vytvořila výrobní výkresy jednotlivých částí nástroje, které jsou přiloženy v přílohách.

Poslední část této práce je ekonomické zhodnocení. Jsou zde porovnány jednotlivé druhy dokončovacích metod z hledisek časových a ekonomických nákladů. Dle porovnávací tabulky jsem zhodnotila metodu hlazení jako nejvýhodnější.

Poděkování

Na závěr bych velice ráda poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Václavu Musilovi, za trpělivost, odborné vedení, za veškerou poskytnutou pomoc a cenné rady. Dále bych chtěla poděkovat mé rodině, mému blízkému okolí a všem ostatním, kteří mne podporovali a věřili mi po celou dobu mého studia.

Bakalářská práce byla vypracována v rámci projektu: „Moderní a produktivní obrábění a metrologie“, reg. č. „SP2019/60“ Specifického výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Seznam použitých zdrojů

1. ALBA PRECISION. *Diamantové nástroje* [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z WWW: < <http://albaprecision.cz/cz/portal/produkty/baublies/diamantove-nastroje/> >
2. BRYCHTA, J. *Obrábění I – Návod pro cvičení 2. část*. Ostrava : Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0577-4.
3. HUMÁR, A. *Technologie I, Technologie obrábění – 3. část* [online]. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2005. [cit. 2018-12-28]. Dostupné z WWW: < http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf >
4. ČEP, R. *Technologie II 2. díl* [online]. Ostrava : Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2008. [cit. 2018-12-28]. Dostupné z WWW: < http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf >
5. Strojírenství – Engineering. *Strojírenská technologie, 3. ročník (témata), Dokončovací operace* [online]. [cit. 2018-12-19]. Dostupné z WWW: < <http://www.strojirenstvi.wz.cz/image.php?subject=1&class=4&topic=38&image=0> >
6. STROJE SVOBODA s.r.o. *Honovací stroj* [online]. [cit. 2018-12-27]. Dostupné z WWW: < <https://www.strojesvoboda.cz/katalog.php?page=DETAIL&katalog=&key=&o=1&id=11528> >
7. ELUC – Elektronická učebnice. *Lapování* [online]. [cit. 2018-12-28]. Dostupné z WWW: < <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1385> >
8. ELUC – Elektronická učebnice. *Jemné soustružení* [online]. [cit. 2019-01-16]. Dostupné z WWW: < <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1382> >
9. ŠPUNDOVÁ, J. *Dokončovací metody obrábění*, 2014. [online]. [cit. 2019-01-16]. Dostupné z WWW: < <https://www.spszengrova.cz/texty/texty/STT/DOKON%C4%8COVAC%C3%8D%20METODY%20OBR%C3%81B%C4%9AN%C3%8D-UT.pdf> >

10. Multimediální výuka Soustružení. *Soustružení* [online]. [cit. 2019-01-16]. Dostupné z WWW: < <https://www.osu.cz/dokumenty/proportal/pdf/kpv/soustruzeni/lekce1.htm> >
11. ELUC – Elektronická učebnice. *Nástrojové materiály* [online]. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z WWW: < <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1206> >
12. Odborný výcvik ve 3. tisíciletí – *Zaškrabávání, zabrušování, lapování* [online]. [cit. 2019-03-27]. Dostupné z WWW: < <http://int.spsoa-ub.cz/projekty/ov3000/STROJ/ZAMECNIK/ZAI-Zaskrabavani,%20zabrusovani%20a%20lapovani.pdf> >
13. SADÍLEK M.; DUBSKÝ J. *Obrábění I – Výběr přednášek*. Ostrava : Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2015. ISBN 978-80-248-3831-1.
14. ELUC – Elektronická učebnice. *Jemné frézování* [online]. [cit. 2019-02-08]. Dostupné z WWW: < <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1383> >
15. ELUC – Elektronická učebnice. *Základní způsoby obrábění* [online]. [cit. 2019-02-08]. Dostupné z WWW: < <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1226> >
16. ČEP, R. *Přednáška 6 – Vrtání, hoblování, obrážení, protahování, protlačování, broušení, dělení materiálu* [online]. Ostrava : Fakulta strojní, VŠB – Technická Univerzita Ostrava [cit. 2019-04-02]. Přednášky z předmětu Strojírenské technologie II. Dostupné z WWW: < <http://homel.vsb.cz/~cep77/> >
17. ELUC – Elektronická učebnice. *Podstata broušení – základní pojmy* [online]. [cit. 2019-04-02]. Dostupné z WWW: < <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1243> >
18. ELUC – Elektronická učebnice. *Podstata broušení* [online]. [cit. 2019-02-12]. Dostupné z WWW: < <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1241> >
19. ELUC – Elektronická učebnice. *Broušení – základní rozdělení brusek – Brusky na díry* [online]. [cit. 2019-04-02]. Dostupné z WWW: < <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1248> >
20. BAUBLIES SURFACE TECHNOLOGY. *Technologie válečkování – základy procesu* [online]. [cit. 2019-04-03]. Dostupné z WWW: < <https://www.baublies.com/technologie-valeckovani.html> >
21. MM Průmyslové spektrum. *Obrábění válečkováním* [online]. [cit. 2019-02-21]. Dostupné z WWW: < <https://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-valeckovanim.html> >
22. Winter servis. *Válečkování povrchu* [online]. [cit. 2019-02-21]. Dostupné z WWW: < http://www.winter-servis.cz/index.php?page=ecoroll/valeckovani_povrchu >

23. Octopus Tools. *Válečkování povrchu kovových výrobků – válečkovací nástroje* [online]. [cit. 2019-02-21]. Dostupné z WWW: < https://www.octopustools.com/Valeckovani/info_valeckovani.php >
24. ALBA PRECISION. *Baublies – Použití metody válečkování* [online]. [cit. 2019-02-22]. Dostupné z WWW: < <http://albaprecision.cz/cz/portal/produkty/baublies/proces-valeckovani-povrchu-pouziti-metody-valeckovani/> >
25. BAUBLIES SURFACE TECHNOLOGY. *Variabilní diamantový nástroj na vnitřní obrábění* [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z WWW: < <https://www.baublies.com/800.html> >
26. BAUBLIES SURFACE TECHNOLOGY. *Diamantový nástroj na vnitřní obrábění* [online]. [cit. 2019-03-13]. Dostupné z WWW: < <https://www.baublies.com/802.html> >
27. BAUBLIES SURFACE TECHNOLOGY. *Hlazení vnitřních povrchů diamantem, základna* [online]. [cit. 2019-03-13]. Dostupné z WWW: < <https://www.baublies.com/803.html> >
28. BAUBLIES SURFACE TECHNOLOGY. *Diamantový nástroj na vnitřní obrábění, pevný* [online]. [cit. 2019-03-14]. Dostupné z WWW: < <https://www.baublies.com/804.html> >
29. BRYCHTA, J.; ČEP R.; PETRŮ J. *Výrobní stroje obráběcí*. 1. vyd., Ostrava : Vysoká škola báňská – Technická univerzita, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2941-8.
30. ResearchGate. *The schamatic view of the lapping to for mirror-like finish on cylindrical inner surface* [online]. [cit. 2019-03-27]. Dostupné z WWW: < https://www.researchgate.net/figure/The-schematic-view-of-the-lapping-tool-for-mirror-like-finish-on-cylindrical-inner-surface_fig1_215689000 >
31. TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie – část 2* [online]. Ostrava : Fakulta strojní, Vysoká škola Báňská – Technická Univerzita Ostrava, 2004 [cit. 2019-04-17]. < <https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/346/cs/studium/studijni-literatura/Strojirenska-metrologie-II-rizeni-jakosti.pdf> >
32. ELUC – Elektronická učebnice. *Porovnání dokončovacích metod* [online]. [cit. 2019-04-17]. Dostupné z WWW: < <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1380> >

33. JAGOŠOVÁ, H. *Válečkování*, 2012. [online]. [cit. 2019-04-25]. Dostupné z WWW: < <http://www.uh.cz/szegsm/files/sblizovani/pdf/modul-valeckovani-pro-tisk.pdf> >
34. Tumlikovo.cz – Metal Cutting Technologies, *Nizkolegované oceli třídy 14, jejich složení a tepelné zpracování* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z WWW: < <http://www.tumlikovo.cz/nizkolegovane-konstrukcni-oceli-tridy-14-jejich-slozeni-a-tepelne-zpracovani/> >
35. Falcon Czech s.r.o., *Eucut 0971 – Chladicí emulze pro výkonové obrábění kovů* [online]. [cit. 2019-04-29]. Dostupné z WWW: < <https://eucut.cz/eucut-0971-chladici-emulze-pro-vykonove-obrabeni-kovu/> >
36. Bohdan Bolzano – ocel v pohybu, *Přehled vlastností oceli 42CrMo4* [online]. [cit. 2019-04-29]. Dostupné z WWW: < https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10083/MOP_vlastnosti_42CrMo4.pdf >
37. Bohdan Bolzano – ocel v pohybu, *Přehled vlastností oceli 16MnCr5* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z WWW: < https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10084/MOP_16MnCr5.pdf >

Přílohy

Příloha A1	Výrobní výkres – Diamantový nástroj
Příloha A2	Výrobní výkres – Spojovací čep
Příloha A3	Výrobní výkres – Tělo nástroje
Příloha A4	Výrobní výkres – Hlava s tělískem
Příloha A5	Výrobní výkres – Hlava nástroje